

Títol: Validació i verificació d'un simulador d'allaus

Volum: 1

Alumne: Màxim Colls Xatart

Director: Pau Fonseca i Casas

Departament: EIO

Data: 16 de Juny de 2009

DADES DEL PROJECTE

Títol del Projecte: Validació i verificació d'un simulador d'allaus

Nom de l'estudiant: Màxim Colls Xatart

Titulació: Enginyeria Tècnica Informàtica de Sistemes

Crèdits: 22.5

Director/Ponent: Pau Fonseca i Casas

Departament: Estadística i Investigació Operativa (EIO)

MEMBRES DEL TRIBUNAL *(nom i signatura)*

President: Josep Casanovas Garcia

Vocal: Joaquim Valls Ribas

Secretari: Pau Fonseca i Casas

QUALIFICACIÓ

Qualificació numèrica:

Qualificació descriptiva:

Data:

*Vull donar mil gràcies als companys que m'han animat, aconsellat i fet costat,
també als amics i familiars que m'han creat l'entorn necessari per poder fer-ho,
i al tutor per saber encoratjar-me en tot moment...☺*

Índex

1	Introducció	9
1.1	Presentació	9
1.2	Objectius	9
1.3	Motivacions	10
2	Marc teòric	12
2.1	Allaus	12
2.1.1	Definició	12
2.1.2	Moviments de vessant	12
2.1.3	Classificació bàsica	17
2.1.4	Nivells d'una allau	18
2.1.5	El mantell nival	20
2.2	Dinàmica d'Allaus	22
2.2.1	Forces impulsores i forces de resistència	22
2.2.2	Forces de resistència	23
2.2.3	Impacte de les allaus	26
2.3	Sistemes d'informació geogràfica	28
2.3.1	Introducció	28
2.3.2	Topologia	28
2.3.3	Model ràster	29
2.3.4	Model vectorial	30
2.3.5	Comparativa ràster i vectorial	32
2.3.6	Fitxers SIG: Idrisi32	32

2.4	Autòmats cel·lulars	34
2.4.1	Introducció	34
2.4.2	Història	35
2.4.3	Definició	36
2.4.4	Condicions de frontera	37
2.4.5	AC multi-n-dimensionals	38
2.5	Validació, Verificació i Acreditació	40
2.5.1	Introducció	40
2.5.2	Nivells de verificació i validació	41
2.5.3	Els tres passos de <i>Naylor</i> i <i>Finger</i>	42
2.5.4	Validació per <i>Caixa Negra</i>	44
2.5.5	Test de <i>Túring</i>	44
3	Anàlisi del model	47
3.1	Introducció	47
3.2	Requisits del model	47
3.3	Estructura del model	48
3.4	Validesa de les dades	49
4	Especificació del model	51
4.1	Especificació de l'AC	51
4.1.1	Conjunt d'Estats	51
4.1.2	Capes de dades	51
4.1.3	Veïnatge	52
4.1.4	Condicions de Frontera	53
4.1.5	Configuració inicial	53
4.1.6	Regles d'Evolució	54
4.2	Hipòtesis del model	57
4.2.1	Hipòtesis inicials	57
4.2.2	Hipòtesis operacionals	57
4.3	Especificació en SDL	64

4.3.1	Sistema	64
4.3.2	Bloc cel·la: Diagrama d'estats	65
4.3.3	Bloc cel·la: Procés <i>Buit</i>	67
4.3.4	Bloc cel·la: Procés <i>Estàtic</i>	68
4.3.5	Bloc cel·la: Procés <i>Dinàmic</i>	69
4.3.6	Bloc cel·la: Procediments	71
4.3.7	Bloc cel·la: Decisions	72
5	Validesa operacional del model	74
5.1	Variables experimentals	74
5.2	Variables resposta	75
5.3	Disseny dels experiments	76
5.3.1	Adaptació del software	76
5.4	Allau NUR029199801	77
5.4.1	Dades experimentals	77
5.4.2	Escenari: Núria1	78
5.5	Allau NTR184200301	80
5.5.1	Dades experimentals	80
5.5.2	Escenari: NogueraTor1	81
5.6	Allau RaspesRoies96	85
5.6.1	Dades experimentals	85
5.6.2	Escenari: RaspesRoies1	86
5.6.3	Escenari: RaspesRoies2	91
5.7	Allau SMR170200604	94
5.7.1	Dades experimentals	94
5.7.2	Escenari: SantMartí1	95
5.8	Allau RUD006200408	97
5.8.1	Dades experimentals	97
5.8.2	Escenari: Ruda1	98
5.9	Anàlisis dels resultats	100

5.9.1	Introducció	100
5.9.2	Mapa de resultats	100
5.10	Test de <i>Túring</i>	103
6	Conclusions i Treball Futur	105
6.1	Conclusions	105
6.2	Treballs futurs	106
A	Informe Allau a Raspes Roies	111
B	Exemple d'AC: el joc de la vida	114
C	Exemple del fitxer de resultats	117
D	Manual d'usuari: Creació d'un escenari	118
E	Manual d'usuari: Execució de simulacions	122

Capítol 1

Introducció

1.1 Presentació

El projecte que es presenta és un treball en el marc de la simulació. La iniciativa sorgeix a partir de la proposta de continuar el desenvolupament d'un simulador d'allaus. Aquest projecte inicial [2] tenia l'objectiu d'analitzar, modelar i finalment implementar un prototip de simulador d'allaus.

El pas següent és el d'iniciar el procés de **verificació i validació** d'aquest model de fluxe d'allaus. Gràcies a la col·laboració de l'Institut Geològic de Catalunya (IGC) es disposa de dades d'allaus reals. Així, a partir d'aquests informes, es podrà iniciar la validació del model.

El projecte s'ha focalitzat en les allaus de placa. Aquest tipus d'allaus, a part de ser la causant de la majoria de víctimes mortals, té unes característiques força peculiars que difereixen amb el comportament dels fluids i dels sòlids. En aquestes allaus, la placa de neu seca que es descohesiona, es va fragmentant i els blocs de placa llisquen ràpidament vessant avall.

1.2 Objectius

L'objectiu del projecte és continuar amb el desenvolupament del simulador per acabar aconseguint un **model vàlid**. A partir de la informació d'allaus reals es començarà un procés que consistirà en comparar el model simulat amb el sistema real. Així, s'iniciarà un procés de validació i verificació tant a nivell conceptual, lògic com operacional. Un disseny dels experiments fent ús de les dades proporcionades per l'IGC serà la tasca més important del projecte.

Per altra banda, tot i que no és l'objectiu principal en aquesta fase de desenvolupament, cal tenir en compte les aplicacions i la usabilitat del simulador. L'obtenció d'un simulador atractiu pels experts en l'estudi de les allaus ha de ser un objectiu present durant tot el procés. Tanmateix, es prepararà el simulador per realitzar el Test de Túring una vegada s'hagi passat aquesta primera fase de validació.

1.3 Motivacions

Descobrir aquest projecte fa que a la vegada decideixi cursar l'assignatura de Simulació. Pensant en la continuació dels meus estudis, trobo un projecte que em servirà de nexa i que cada element que el compona és un tema que m'interessa. És un projecte que em permetrà tenir experiència amb els SIG¹, participar en la millora i implementació d'un simulador i començar un procés tant important com és el de validació. A més a més, em permetrà conèixer millor el meu territori i aprofundir amb la problemàtica de les allaus, un tema que fins ara no havia prestat especial atenció.

Disposar de la col·laboració de l'IGC també ha estat una gran motivació. Això fa que el projecte agafi una altra dimensió i la informació passa a tenir un altre valor. Això fa que moltes vegades un s'hagi d'adaptar, exprimint el màxim possible la informació de què es disposa.

¹Sistemes d'Informació Geogràfica

Capítol 2

Marc teòric

(fonts: Simulador d'allaus [2])

2.1 Allaus

2.1.1 Definició

- ▷ Una allau és una massa de neu que es desprèn i es precipita pel vessant d'una muntanya. (Association national pour l'étude de la neige et des avalanches (ANENA), 2002).
- ▷ Una allau és una massa de neu que cau i es precipita avall pel vessant d'una muntanya. (Viquipèdia, 2009)

2.1.2 Moviments de vessant

Els processos geològics i climàtics que afecten a la superfície terrestre creen el relleu i defineixen la morfologia dels vessants, que va modificant-se al llarg del temps per adaptar-se a noves condicions geològiques o climàtiques. Generalment, els vessants adopten pendents naturals propers a l'equilibri i davant d'un canvi de condicions, la seva morfologia es modifica buscant de nou aquest equilibri. D'aquesta manera, els moviments poden entendre's com reajustaments del terreny per tal d'aconseguir l'equilibri davant d'un canvi de condicions.

Com àrees més propenses a la inestabilitat, sota un punt de vista global, trobem les zones muntanyoses, zones de relleu amb processos erosius i de meteorització intensos, vessants de valls fluvials, zones argiloses, zones sísmiques i zones d'altres

precipitacions, entre d'altres.

Els lliscaments en vessants naturals poden ser profunds i mobilitzar milions de metres cúbics de material; els mecanismes de trencament, a més a més, solen ser complexos, estant condicionats per factors o processos a escala geològica (falles, processos tectònics, litorals, fluxos d'aigua subterrània, etc). Les inestabilitats en els vessants, es deuen al desequilibri entre les forces internes i externes que actuen sobre el terreny, de tal manera que les forces desestabilitzadores superen a les forces resistents. Aquest desequilibri pot ser degut a una modificació de les forces existents o a l'aplicació de noves forces externes estàtiques o dinàmiques.

Els moviments de vessant engloben diferents tipus de processos, com per exemple: lliscaments, desprendiments, fluxos i colades de fang, reptació, devessalls rocosos o de neu, entre d'altres.

Les classificacions dels moviments de vessant solen referir-se als tipus de materials involucrats i al mecanisme i tipus de ruptura, considerant també altres aspectes com el contingut en aigua del terreny, i la velocitat i magnitud del moviment. A continuació descrivim la tipologia d'aquest tipus de fenòmens.

Fluxos

Els fluxos, o colades, són moviments de masses de sòl, acumulacions de fragments de roca o blocs rocosos, amb abundant presència d'aigua, on el material està disgregat i es comporta com un fluid, patint una deformació continua sense presentar superfícies de ruptura definides. L'aigua és el principal agent desencadenant degut a la pèrdua de resistència que origina en materials poc cohesius. Principalment, afecten a sòls argilosos que pateixen una notable pèrdua de resistència al ser mobilitzats; aquests moviments, poc profunds en relació a la seva extensió, presenten una morfologia de tipus glacera i poden tenir lloc en vessants de baixes pendents (inclús menors a 10 graus). Aquests moviments poden arribar a assolir varis quilometres.

Les colades de fang sorgeixen quan tot el material del vessant es sobrehidrata i flueix cap els fons de la vall. La caiguda del material és contínua i brusca degut a que aquest conté la suficient aigua per augmentar la plasticitat i la fluïdesa de la superfície, conferint-li d'aquesta manera una gran mobilitat encara que el pendent no sigui gaire pronunciada.

Les colades de fang generalment es presenten en petites magnituds, però en determinades condicions de saturació, poden ser molt extenses i ràpides. Els dipòsits de materials volcànics, per les seves propietats físiques i geomecàniques, són especialment susceptibles a aquest tipus de processos. La velocitat de la massa que llisca

és més gran a la part superior que a la inferior.

En els sòls de tipus loess (dipòsits de material fi no consolidat) i en arenes seques poden tenir lloc fluxos induïts per moviments sísmics, provocats generalment per col·lapses deguts a la ruptura dels enllaços entre partícules; si aquests materials es troben saturats o submergits, es crea una massa sense cohesió que pot fluir amb velocitats molt elevades.

Els fluxos de fragments de roca són moviments complexos que engloben fragments rocosos, blocs, cantells i grava en una matriu d'arenes, llims i argila. Tenen lloc en vessants coberts per material no consolidat, com és el cas dels dipòsits de morrenes glacials i, especialment, en aquells on no existeix cobertura vegetal. Normalment l'àrea font d'aquests fluxos varia entre els 20 i els 45 graus d'inclinació i en la zona d'acumulació entre 5 i 15 graus, assolint els processos velocitats fins als 15m/s.

Els fluxos poden ser conseqüència de lliscaments o ser induïts per desprendiments. Juntament amb els lliscaments són els moviments de vessant més habituals, al afectar a molt diversos tipus de materials.

Lliscaments

Els lliscaments són característics de masses de roca en les que existeix una superfície de trencament que separa la roca desplaçada de la subjacent o substrat immòbil. Aquesta superfície de trencament pot ser una superfície d'estratificació, una capa de materials plàstics o discontinuïtats tectòniques.

El desencadenament d'aquest fenomen té lloc quan l'esforç tangencial derivat del pes del bloc supera el fregament intern de la superfície de trencament. És evident que com major sigui el pendent major serà la facilitat en que apareguin aquests fenòmens, de la mateixa manera que si la presència d'aigua (subterrània, de pluja o de regadiu) és abundant entre les discontinuïtats de la roca. Per un costat, si la roca està impregnada d'aigua, augmentarà el pes del bloc, i per un altre costat el fregament intern es veurà disminuït en el pla de trencament.

La massa, generalment, es desplaça en conjunt, comportant-se com una unitat en el seu recorregut; la velocitat pot ser molt variable, però acostumen a ser processos ràpids que poden assolir grans volums (varis milions de metres cúbics). En ocasions, quan el material lliscat no aconsegueix l'equilibri al peu del vessant, per la seva pèrdua de resistència, contingut en aigua o pel pendent existent, la massa pot seguir en moviment i assolir velocitats molt elevades, donant lloc a un flux. Existeixen dos tipus de lliscament clarament diferenciats:

- ▷ Els lliscaments rotacionals són més freqüents en sòls cohesius. La ruptura, superficial o profunda, té lloc a favor de superfícies corbes. Una vegada iniciada la inestabilitat, la massa comença a rotar dividint-se en varis blocs que llisquen entre sí, donant lloc a una superfície esglaonada basculada cap al pendent i amb esquerdes de tracció estriades. Les dimensions d'aquests fenòmens poden arribar als centenars de metres, tant en longitud com en amplada, i poden ser superficials o profunds (fins a 10 metres màxim). La part inferior de la massa lliscada s'acumula al peu del vessant formant un dipòsit, normalment amb escletxes de tracció transversals. Depenent del tipus de sòl i del contingut d'aigua es poden generar fluxos.
- ▷ En els lliscaments traslacionals la ruptura té lloc en superfícies planes de debilitat preexistents (superfície d'estratificació, contacte entre diferents tipus de material, superfície estructural, etc); en ocasions, el pla de ruptura és una fina capa de material argilós entre estrats de major competència. No solen ser molt profunds, encara que si extensos i assoleixen grans distàncies. Poden donar-se en sòls i en roques, i les masses que llisquen en ocasions són blocs rectangulars prèviament independitzats per discontinuïtats o per escletxes de tracció (lliscament de blocs). Són freqüents en aquest tipus d'inestabilitats els moviments a impulsos, es a dir, en fases diferents en el temps, segons siguin les condicions de resistència dels plans de lliscament, que no tenen perquè presentar un gran pendent. Generalment, els desplaçaments traslacionals són més ràpids que els rotacionals, degut a la cinemàtica del mecanisme de ruptura.

Reptació

Moviment superficial molt lent, pràcticament imperceptible, que afecta a sòls i materials alterats, provocant deformacions continues que es manifesten al cap d'un temps en la inclinació o manca d'alineació d'arbres, tanques, murs, pals, etc, en els vessants.

Solifluxió

La solifluxió afecta a la zona més superficial dels vessants. Es tracta d'un moviment produït pels processos de congelació i fusió que, pels canvis diaris o estacionals de temperatura, afecta a l'aigua continguda en els sòls.

Despreniments

Els desprendiments són processos que es caracteritzen per la caiguda lliure de blocs individuals de massa rocosa de diversa grandària, a vegades considerable, independitzats per plans de discontinuïtat preexistents (tectònics, superfícies d'estratificació, escletxes de tracció, etc). Són habituals en vessants de zones muntanyoses escarpades, en penya-segats i, en general, en parets rocoses, essent freqüents les ruptures en forma de cunya i en blocs formats per varies famílies de discontinuïtats. Els principals desencadenants són la erosió, la pèrdua de recolzament, la presència d'aigua en discontinuïtats i escletxes, els moviments sísmics, entre d'altres.

Devessalls rocosos

Aquests processos, considerats com desprendiments o moviments complexos en algunes classificacions, són molt ràpids, amb caiguda de masses de roca que es desprenen de vessants escarpats i que poden anar acompanyades de gel i neu. Les masses rocoses es trenquen i es polvoritzen durant la caiguda, donant lloc a dipòsits amb una distribució caòtica de blocs, amb grandàries molt diverses, sense estructura, pràcticament sense abrasió i amb gran porositat.

Els devessalls són generalment el resultat de lliscaments o desprendiments de gran magnitud que, per l'elevació del pendent i la manca d'estructura i cohesió dels materials, descendeixen vessant avall a gran velocitat podent superar els 100km/hora.

L'aigua de precipitacions o de desgel, els moviments sísmics i les erupcions volcàniques poden jugar un paper important en el desencadenament d'aquests processos.

Desplaçaments laterals

Aquest tipus de moviment fa referència al moviment de blocs rocosos o masses de sòl molt coherent i cimentat sobre un material tou i deformable. Els blocs es desplacen molt lentament a favor de pendents molt baixes. Els moviments són deguts a la pèrdua de resistència del material subjacent, que flueix o es deforma sota el pes dels blocs rígids. Els desplaçaments laterals també poden ser provocats per liquèfacció del material subjacent o per processos d'extrusió lateral d'argiles toves i humides, sota el pes de les masses superiors. Es donen en vessants molt suaus, i poden ser molt extensos. Les capes superiors es fragmenten generant escletxes, desplaçaments diferencials, bolcades, etc, presentant les zones afectades un aspecte caòtic.

2.1.3 Classificació bàsica

Segons l'Institut de Cartografia de Catalunya, qualsevol fenomen d'allau es pot englobar en un dels següents tipus bàsics.

Allaus de neu recent

Les anomenades allaus de neu recent són les produïdes durant o just després d'intenses nevades. El desencadenament d'aquesta varietat d'allau es produeix principalment a causa de la pèrdua de cohesió de la capa superficial per sobrecarrega o per l'augment de la temperatura durant o després de la nevada.

Dins d'aquesta categoria cal fer una distinció entre allaus de neu humida i allaus de neu seca. Les primeres són degudes a nevades en temperatures properes als 0°C, mentre que les segones són degudes a nevades en temperatures notablement inferiors als 0°C. Aquestes últimes es produeixen en els períodes més freds d'hivern i són molt ràpides i destructives.

Allaus de fusió

Les allaus de fusió són degudes al desglaç del mantell nival quan la temperatura de l'aire augmenta notablement per sobre dels 0°C o bé en cas de pluja.

La neu és humida i feixuga, pel que la velocitat de lliscament és lenta. Aquesta varietat d'allaus es produeix principalment en primavera o en períodes calorosos d'hivern i són les més comuns.

Es pot donar el cas de que el mantell nival llisqui en la seva totalitat, arrossegant fang, roques o vegetació. Aquestes subtipus d'allaus són anomenades allaus de fons.

Allaus de placa

Les allaus de placa, les quals han acabat sent escollides com objecte de modelatge en aquets projecte, són degudes a l'existència de discontinuïtats en el mantell nival que provoquen el lliscament de les capes superiors, aparentment estables, per damunt d'una capa de baixa cohesió o una superfície de regel.

Un cas particular són les dures i fràgils plaques de vent que es formen en la part superior del mantell, originades per l'acumulació de neu transportada pel vent de sobrevent a sotavent.

Aquests tipus d'allaus, que es donen tant en hivern com en primavera, es pro-

dueixen en vessants oberts, sobretot en zones convexes, i poden ser de causa natural (precipitació de pluja, acció del vent, sobrepès de neu, precipitació de roques, pas d'animals, ...) o d'origen humà (pas de maquinaria o de persones).

2.1.4 Nivells d'una allau

Definicions:

Zona de sortida: és la zona on la neu inestable comença el desplaçament. Hi ha una acceleració significativa de la massa de neu.

Zona de trajecte: és el pendent que connecta la zona de sortida amb la zona de dipòsit. La velocitat de l'allau arriba al seu màxim valor. Es produeixen incorporacions i/o pèrdues de neu.

Zona de dipòsit: és l'àrea on es produeix la desacceleració i el flux es diposita.

Zona de sortida

▷ Tipus de sortida

- Espontània: causes internes del mantell nival.
- Provocada: causes externes del mantell nival. Les causes poden ser antròpiques o no antròpiques. Les antròpiques poden ser voluntàries (allaus artificials) o involuntàries (allaus accidentals).

▷ Forma de sortida

- Puntual: allau que parteix d'un punt.
- Lineal: allau que parteix d'una línia.

▷ Qualitat de la neu - tipus

- Recent
- Evolucionada

▷ Qualitat de la neu - contingut en aigua

- Nul: Neu seca.
- Dèbil: Neu humida.
- Fort: Neu mullada.

- ▷ Qualitat de la neu - Cohesió
 - Dèbil: Neu pols.
 - Moderada: Placa friable.
 - Forta: Placa dura
- ▷ Posició del pla de lliscament
 - En el mantell nival.
 - Sobre el sòl.

Zona de trajecte

- ▷ Forma del terreny
 - Pendent oberta.
 - Canal.
- ▷ Dinàmica de flux
 - Sense núvol de partícules de neu.
 - Amb núvol de partícules de neu (aerosol), que pot estar situat en el front o la cua d'aquesta (amb estela).
 - Només format per partícules de neu (aerosol pur).
- ▷ Neu incorporada
 - Amb incorporacions.
 - Sense incorporacions
- ▷ Presència de blocs i/o altres elements
 - Presents (blocs de neu o gel, roques, vegetació, etc).
 - No presents.

Zona de dipòsit

- ▷ Rugositat superficial
 - Dèbil.
 - Sense incorporacions

- ▷ Qualitat de la neu
 - Humida.
 - Seca.
- ▷ Brutícia visible
 - Contaminat (Presencia de terra, roques o vegetació).
 - Net.

2.1.5 El mantell nival

El mantell nival es compon d'una estratificació de capes de neu corresponent a les diverses nevades que es produeixen al llarg de la temporada. Cada capa o estrat de neu presenta unes característiques morfològiques, termodinàmiques i mecàniques concretes. Aquestes característiques són les que proporcionen al mantell un determinat grau d'estabilitat i, per tant, condicionen la possibilitat que puguin produir-se allaus. En funció dels elements meteorològics el mantell nival va evolucionant d'un estat a un altre, variant per tant el seu grau d'estabilitat.

Anàlisi del mantell nival

Els sondeigs per colpeix i els perfils estratigràfics permeten conèixer l'estructura del mantell en un lloc i moment concrets. A partir d'aquests anàlisis i conjuntament amb les dades nivometereològiques diàries s'elaboren els butlletins de predicció d'allaus.

El sondeig per colpeix consisteix en fer penetrar al mantell una sonda amb una mida i un pes determinat (sonda Haefeli), i calcular la resistència que ofereix a la penetració. La resistència a la penetració dóna idea de la cohesió de cada capa de neu. Posteriorment es realitza el perfil estratigràfic, que consisteix en fer un tall vertical a la neu de manera que totes les capes quedin a la vista i puguin ser descrites en detall (tipus i diàmetre dels grans, humitat, duresa i densitat), i finalment s'efectua un perfil de temperatura, mesurant aquest paràmetre cada 10 cm, des de la superfície fins a la base del mantell. Amb les dades obtingudes és possible localitzar punts dèbils en l'estratificació del mantell nival, com per exemple plans de lliscament, capes inestables, etc.

Escala europea de perill d'allaus

- ▷ 1) Feble

El mantell nival està ben estabilitzat a la majoria dels pendents.

El desencadenament d'allaus és possible en alguns pendents drets, en general per una sobrecàrrega forta. Poden haver-hi caigudes espontànies de petites allaus.

▷ **2) Moderat**

El mantell nival està moderadament estabilitzat en alguns pendents suficientment drets. A la resta està ben estabilitzat.

És possible el desencadenament d'allaus sobretot per una sobrecàrrega forta i en alguns pendents d'orientació i altitud indicats. No s'esperen caigudes espontànies d'allaus de gran dimensions.

▷ **3) Marcat**

El mantell nival està entre moderadament a feblement estabilitzat en nombrosos pendents suficientment drets.

És possible el desencadenament d'allaus fins i tot per una sobrecàrrega feble en nombrosos pendents. En algunes situacions són possibles les caigudes espontànies d'allaus que poden ser de mida mitjana i, de vegades, gran.

▷ **4) Fort**

El mantell nival està feblement estabilitzat a la major part dels pendents suficientment drets.

És probable el desencadenament d'allaus fins i tot per una sobrecàrrega feble i sobretot en nombrosos pendents. En algunes ocasions, s'han d'esperar nombroses caigudes espontànies d'allaus de mida mitjana i, de vegades, gran.

▷ **5) Molt Fort**

La inestabilitat del mantell nival és generalitzada.

Hi haurà nombroses caigudes espontànies de grans allaus, fins i tot en pendents poc drets.

2.2 Dinàmica d'Allaus

2.2.1 Forces impulsores i forces de resistència

Al produir-se la fractura en una placa, la massa de neu accelera en el sentit del pendent, lliscant sobre una altra capa de neu o sobre el sòl.

Dos conjunts oposats de forces actuen en l'allau: la força impulsora (F), component paral·lel a la superfície que actua en el sentit del pendent, i la força de resistència (R), que està composada per diverses forces oposades a la força impulsora i que prevenen que l'allau acceleri indefinidament.

La força impulsora i les forces de resistència actuen en la massa en moviment determinant la seva acceleració i velocitat màxima. La importància de les diverses forces de resistència depenen del tipus d'allau.

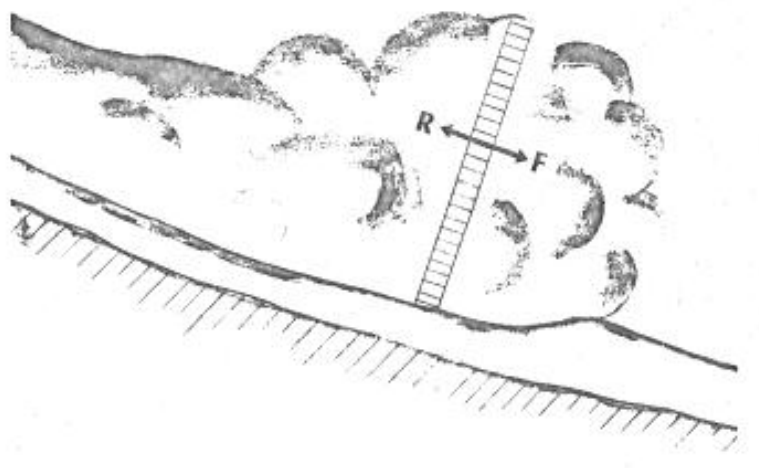


Figura 2.1: Força impulsora i forces de resistència

L'allau accelerarà mentre F sigui superior a R donat que existirà una força neta (i una acceleració resultant) en el sentit del pendent. La condició $F > R$ és satisfeta en la zona de sortida. Aquí la acceleració ocorre perquè el pendent és pronunciada i, per tant, la força d'impulsió F és gran. Addicionalment, la neu inestable de la zona de sortida pot anar-se incorporant a l'allau causant l'augment de la massa en moviment.

Es defineix, normalment, la zona de sortida com l'àrea que suporta l'allau on el

desnivell del pendent supera els 30° (58%). Aquesta àrea habitualment és major que la superfície de la massa de neu inicial de l'allau.

La massa assoleix una velocitat constant quan R iguala a F . Aquesta condició de màxima velocitat ocorre en la transició entre la zona de sortida i la zona de dipòsit. Aquesta àrea de transició és normalment coneguda com àrea de recorregut. En aquesta zona la velocitat canvia contínuament segons canvis en el gradient, entrada de neu nova, deposició i irregularitats topogràfiques.

La desacceleració succeeix en la zona de dipòsit, on R és superior a F . Aquí el gradient es redueix i com a resultat la força impulsora també és reduïda. A més a més, la capa subjacent de la neu és estable i l'energia cinètica del flux es va dissipant.

La distribució del dipòsit de l'allau defineix els límits de la zona de dipòsit i probablement depèn més del tipus de neu i les característiques de l'allau que de la rugositat de la superfície d'aquesta zona.

Tot això es aplicable a totes les allaus sense importar el tipus ni la grandària. Totes comencen en una zona de sortida i acaben en una zona de dipòsit. En qualsevol d'aquests fenòmens el tipus i la quantitat de neu incorporada a l'allau determina el balanç entre forces, la velocitat, les dimensions, la quantitat de neu entrant i la localització de la zona de dipòsit. Com succeeix en la majoria de fenòmens naturals, existeix una relació inversa entre grandària i probabilitat de l'esdeveniment.

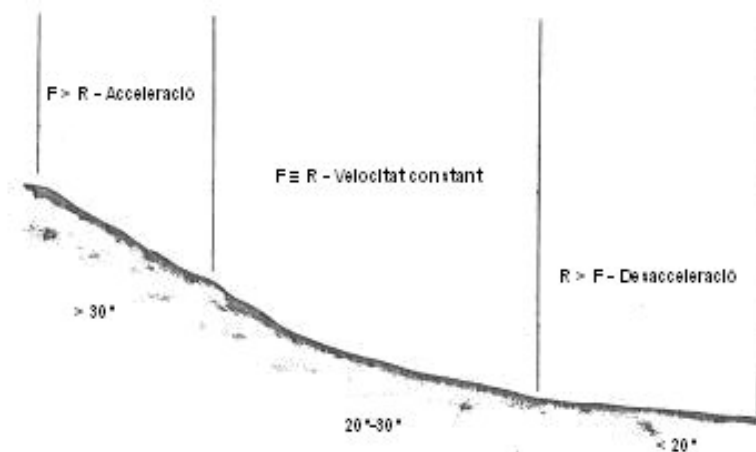


Figura 2.2: Pendent i forces

2.2.2 Forces de resistència

Els següents són els principals factors que contribueixen a la resistència friccional de l'allau:

- R1:** Fricció de lliscament entre l'allau i la neu subjacent o el sòl.
- R2:** Forces de resistència internes de la neu degut a la cohesió, col·lisions i canvis en la quantitat de moviment.
- R3:** Fricció de turbulència en la suspensió neu/aire.
- R4:** Fricció de tall entre l'allau i l'aire circumdant.
- R5:** Fricció amb fluids al front de l'allau.

La força neta d'acceleració de l'allau és la suma de totes les forces que actuen en ella.

$$a = \frac{F_i - (R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5)}{m} \quad (2.1)$$

On F és la força impulsora. La importància relativa de cada component de la resistència variarà segons el tipus d'allau. El tipus de neu de l'allau, tanmateix, depèn de les característiques de la capa de neu anterior al desencadenament de l'allau, en el tipus de neu que es troba en el camí i en la topografia d'aquest. En una allau de neu seca la densitat i la força mecànica de la placa llançada probablement determina la importància de les diverses resistències.

En plaques dures la neu està consolidada fortament. Abans de l'inici de l'allau la majoria de la massa de neu està aparentment composta per blocs relativament grans (probablement de 10 a 100 cm de llargada). Aquests blocs llisquen, giren, boten i col·lionen entre ells però a causa de la seva gran grandària i velocitat els grans de neu mai arriben a entrar en suspensió. La massa es mou com si fos una cascada de blocs de neu discrets i l'allau mai arriba a esdevenir flux. La resistència al moviment la produeixen principalment les forces R_1 i R_2 . Les 3 restants probablement contribueixen mínimament.

Després d'un desencadenament d'una placa tova, la desintegració i la incorporació d'aire són molt ràpids i part de la massa queda suspena per sobre de la superfície. Com a resultat del creixent increment de partícules de neu en suspensió, l'alçada i velocitat del flux augmenten i l'allau pren forma de fluid i, per tant, les forces R_1 i R_2 veuen disminuïda la seva importància. Les partícules de neu més petites poden enlairar-se mentre que la massa més densa, compresa per partícules de neu més grans, roman lliscant sobre la superfície.

Les allaus de neu pols poden arribar a assolir grans velocitats (aproximadament 60m/s) i poden viatjar grans distàncies en pendents no gaire pronunciades (baix

gradient). El despreniment de neu tova i seca desencadena una allau de pols i en forma de flux (mig i mig).

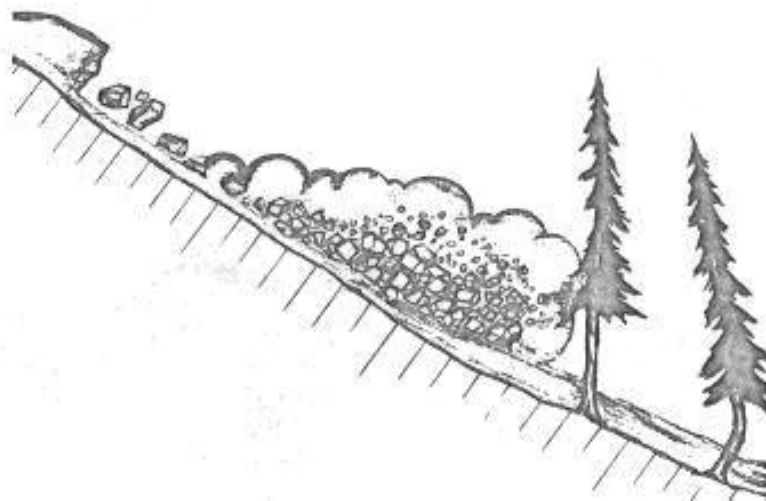


Figura 2.3: Composta de fragments de la placa, possibl  núvol de pols

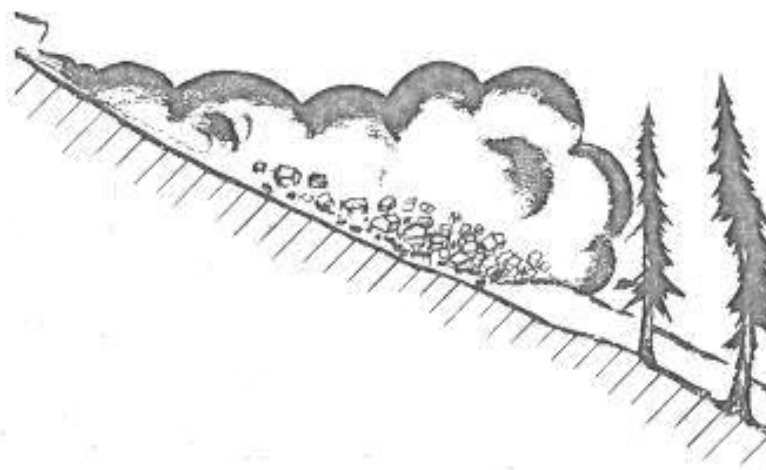


Figura 2.4: Entrada d'aire, neu en suspens  

Les allaus resultants del despreniment de neu humida, tant per fractures de placa com per desencadenaments puntuals, usualment es desintegren ràpidament en una massa pastosa que assoleix relativament baixes velocitats. Com que hi ha poca entrada d'aire en les allaus d'aquests tipus el flux no assoleix grans alçades. Les

forces de resistència R1 i R2 són molt més importants que R3, R4 i R5. No obstant, tot i que les velocitats són baixes, les allaus de neu mullada poden ser molt perilloses en el seu impacte donada l'alta densitat d'aquestes masses de neu.

Velocitat aproximada d'una allau segons el tipus de neu i grandària:

Tipus	Petita	Mitjana	Gran
Neu humida	$< 10m/s$	$10m/s - 20m/s$	$20m/s - 35m/s$
Neu seca	$< 10m/s$	$10m/s - 35m/s$	$35m/s - 60m/s$
Neu pols	$< 25m/s$	$25m/s - 60m/s$	$60m/s - 90m/s$

Taula 2.1: Velocitat d'una allau segons el tipus de neu

2.2.3 Impacte de les allaus

Les allaus poden produir grans forces dinàmiques sobre els objectes. El coneixement d'aquestes forces esdevé fonamental en el disseny de construccions ubicades en camins d'allaus.

Allaus de neu seca (alta velocitat i baixa densitat), fluïran per sobre i pels costats dels objectes, engolint-los com si fos un autèntic fluid. Això produeix una pressió d'estancament, que pot ser calculada de la següent manera:

$$P = \frac{1}{2}pV^2 \quad (2.2)$$

On P és la pressió, p és la densitat de l'allau i V la velocitat. La força total sobre l'objecte la podem calcular mitjançant la multiplicació de la pressió per l'àrea de la superfície exposada i un coeficient de fregament.

Les allaus lentes i denses, per contra, no engoliran els objectes, si no que part de la massa s'acumularà al costat de l'objecte i una altra part sortirà desviada. En aquests casos la pressió total pot ser calculada segons indica l'expressió 2.3, així la pressió d'allaus denses i lentes serà el doble que la de les allaus de baixa densitat i ràpides.

$$P = pV^2 \quad (2.3)$$

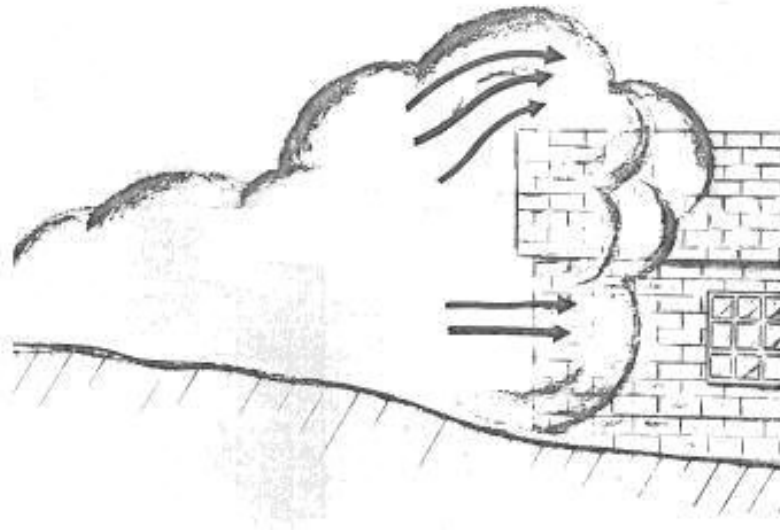


Figura 2.5: Impacte d'allau de neu seca

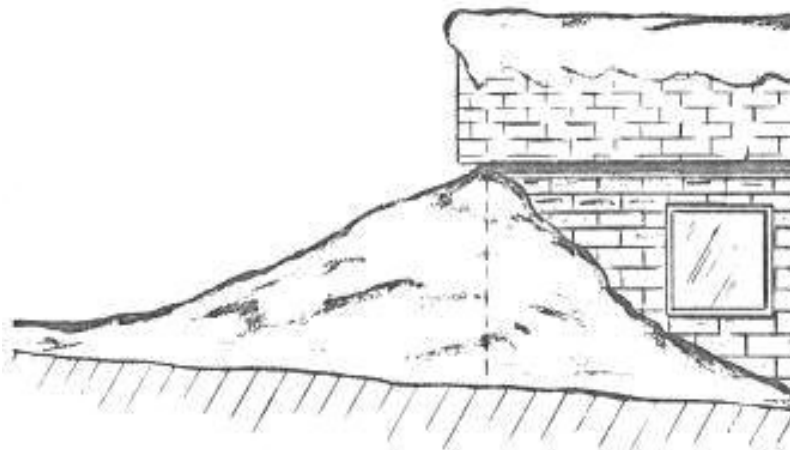


Figura 2.6: Impacte d'allau de neu humida

2.3 Sistemes d'informació geogràfica

2.3.1 Introducció

Un Sistema d'Informació Geogràfica (SIG o GIS, acrònim en anglès) és una integració de *software*, *hardware* i dades geogràfiques dissenyada per capturar, emmagatzemar, manipular i analitzar la informació geogràficament referenciada amb la finalitat de resoldre problemes complexes de planificació i gestió. En general podem dir que és qualsevol sistema d'informació capaç d'integrar, emmagatzemar, editar, analitzar i mostrar la informació geogràficament referenciada.

2.3.2 Topologia

El principal cas per utilitzar un SIG és per la gestió d'informació espacial. El sistema permet separar la informació en diferents capes temàtiques i les emmagatzema independentment permetent treballar amb elles de manera ràpida i senzilla.

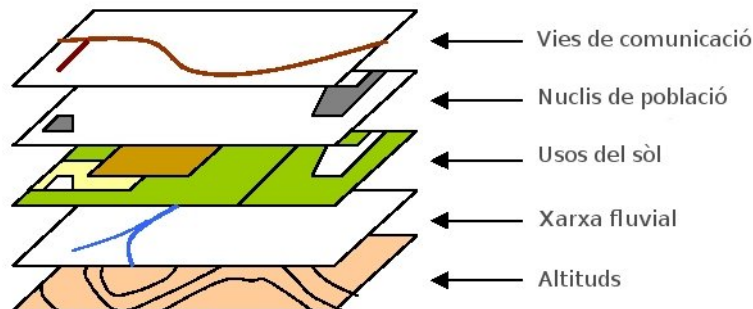


Figura 2.7: Un SIG pot mostrar informació en capes temàtiques

L'estructuració de la informació espacial procedent del món real en capes comporta cert nivell de dificultat. En primer lloc, la necessitat d'abstracció que requereixen les màquines implica treballar amb primitives bàsiques de dibuix, de tal forma que tota la complexitat de la realitat ha de ser reduïda a punts, línies o polígons.

Tanmateix, existeixen relacions espacials entre els objectes geogràfics que el sistema no pot obviar; la topologia, que en realitat és el mètode matemàtic-lògic usat

per a definir les relacions espacials entre els objectes geogràfics pot arribar a ser molt complexa, degut a que són molts els elements que interactuen sobre cada aspecte de la realitat.

La topologia d'un SIG redueix les seves funcions a qüestions molt més senzilles, com per exemple conèixer el polígon (o polígons) que pertany una determinada línia, o bé saber quina agrupació de línies formen una determinada carretera.

Existeixen diverses formes de modelar les relacions entre els objectes geogràfics o topologia. Depenent de la forma que això es porti a terme es té un o altre tipus de Sistema d'Informació Geogràfica dins d'una estructura de dos grups principals: SIG vectorials i SIG raster. No existeix un model de dades que sigui superior a un altre, sinó que cadascun té una utilitat específica.

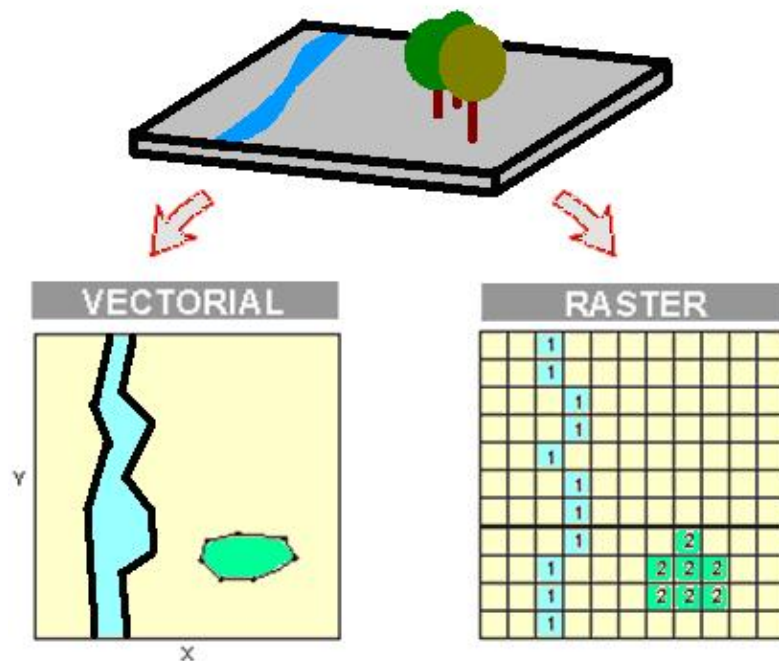


Figura 2.8: Capes raster i vectorial per un SIG

2.3.3 Model ràster

El model de SIG raster es centra en les propietats de l'espai més que en la precisió de la localització. Divideix l'espai en cel·les regulars on cadascuna representa un únic valor. Quant majors siguin les dimensions de les cel·les menor serà la precisió o detall en la representació de l'espai geogràfic.

Codificació Raster: En un model raster, l'origen per a la numeració de cel·les és

el cantó superior esquerra de la imatge. Amb la rasterització s'assignen codis a les cel·les segons tres tipus de mostreig:

- Modal: el més representatiu de la cel·la.
- Punt mig: el que representi el punt central de cel·la.
- Lògic: si una entitat en qüestió apareix o no.

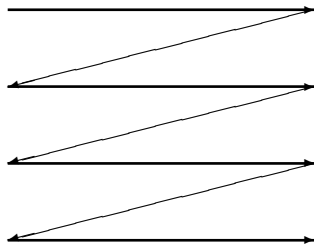
Emmagatzematge Raster: Les cel·les poden prendre un valor sencer (variables discretes) o reals (variables contínues). També poden haver cel·les amb valor nul o desconegut (No data). Els valors de les cel·les es poden emmagatzemar en espais de memòria distribuïts en diferents formes i a partir de diverses modalitats de lectura.

Distribució:

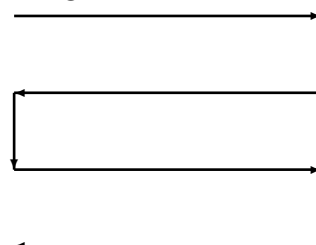
- per enumeració exhaustiva: 2,2,2,0,3,3,1,2,2,2,1,1,3,3,3,3,3,1,1,3,3,3,0.
- per grups de longitud variable: 2-3, 0-1, 3-3, 1-1, 2-3, 1-2, 3-6,1-2, 3-3, 0-1.

Modalitats de lectura:

Ordre convencional.



En greca.



2.3.4 Model vectorial

En el cas del model de SIG vectorial, l'interès de les representacions es centra en la precisió de localització dels elements sobre l'espai.

Al principi els SIG varen emprar estructures d'emmagatzematge vectorial molt simples com els Spaghetti i els Diccionaris de vèrtexs que no aconseguien tractar relacions topològiques.

Actualment s'usa l'estructura Arc-node, en la qual el sistema pot identificar relacions com la inclusió, la adjacència, entre d'altres, gràcies a un conjunt de taules

topològiques, una per a polígons, una per a arcs i finalment una per a nodes. En una mateixa capa no és necessari repetir segments, distingint-se igualment la topologia.

Per exemple, si els polígons comparteixen un mateix arc llavors hi ha adjacència de polígons; si hi ha un node inicial o final repetit en dos arcs llavors hi ha connectivitat d'arcs; si hi ha un registre negatiu significa que hi ha inclusió d'una figura en una altra.

2.3.5 Comparativa ràster i vectorial

Avantatges

Vectorial:

- ▷ L'estructura de dades és compacta i requereix menys memòria
- ▷ Codificació eficient de la topologia i les operacions espacials.
- ▷ Bona representació gràfica. Els elements no perden definició al reescalar la imatge.
- ▷ Millor compatibilitat en entorns de bases de dades relacionals.

Ràster:

- ▷ L'estructura de dades és molt senzilla.
- ▷ Les operacions de superposició són molt senzilles.
- ▷ Format òptim per variacions altes de dades.
- ▷ Bon emmagatzematge d'imatges digitals.

Desavantatges

Vectorial:

- ▷ L'estructura de dades és més complexa.
- ▷ Les operacions de superposició són més complicades d'implementar i representar.
- ▷ L'eficàcia és reduïda quan la variació de dades és alta.
- ▷ És un format més costós de mantenir actualitzat.
- ▷ La quantitat d'informació que pot emmagatzemar és molt limitada.

Ràster:

- ▷ Major requeriments de memòria d'emmagatzematge. Totes les cel·les contenen dades.
- ▷ Les regles topològiques són més difícils de generar.
- ▷ La representació gràfica és menys vistosa i estètica. Segons la resolució de l'arxiu, els elements queden més o menys definits.

2.3.6 Fitxers SIG: Idrisi32

Descrivim a continuació l'arxiu de representació d'informació geogràfica utilitzat en l'implementació del simulador: l'Idrisi32. Un anàlisi exhaustiu sobre els diferents

tipus de representació SIG existents el podem trobar en el PFC *Integración de datos SIG en un simulador* [3].

Idrisi32 és un sistema d'informació geogràfica fonamentalment raster, ja que els anàlisi es realitzen amb aquest model. És possible incorporar informació vectorial però aquest probablement (en funció del problema) l'acabarà transformant a raster o l'emprarà com a capa per a superposar els arxius raster.

Idrisi32 es basa en dos tipus de fitxers: dades i metadades. Els fitxers de dades contenen la tupla coordenada - valor d'atribut, mentre que els fitxers de metadades, per la seva banda, són la informació sobre les pròpies dades (nom, origen, qualitat, precisió, etc), també són anomenades "documentació dels fitxers de dades".

Dades i metadades són emmagatzemades en un fitxer individual cadascuna, amb el mateix nom però amb diferents extensions.

Els fitxers Idrisi32 de dades Raster tenen una estructura molt simple: consisteixen en una llista seqüencial de valors (columna de valors). La documentació del fitxer emmagatzema el nombre de columnes i files, per a que el software pugui representar- ho en forma de taula bidimensional. Els valors de cel·la estan disposats de manera que el primer valor pertany a la cel·la superior esquerra i l'últim a la cel·la inferior dreta. El fitxer de documentació conté la informació de les dades i de com s'han de representar

En quant al model vectorial, IDRISI32 utilitza fitxers de vectors d'atributs. Contràriament a les estructures tipus *Spaghetti*, reconeix vectors d'atributs o objectes (punts, línies i polígons), però, en contrast a d'altres sistemes com Arc/Info o Cartalinx, no reconeix informació topològica (Connectivitat o veïnatge d'atributs). En altres paraules, els atributs són reconeguts, però l'anàlisi espacial és limitat.

Punts, línies i polígons han d'estar en fitxers diferents. Els atributs poden ser embeguts (assignats a punts i emmagatzemats en el propi vector) o poden ser emmagatzemats externament en una taula i enllaçats mitjançant identificadors emmagatzemats en el propi vector)

Per fitxers de punts, cal especificar el nombre de punts en el fitxer, i aleshores afegir els identificadors i coordenades de cada punt.

Per fitxers de línies, cal especificar el nombre de línies en el fitxer i aleshores, per cada línia, afegir el seu identificador i les coordenades de cada punt inclòs en la línia.

Per fitxers de polígons, cal especificar el nombre de polígons, i aleshores, per cada polígon, afegir el seu identificador i les coordenades de cada punt que forma un polígon. La primera i última coordenada ha de ser la mateixa.

2.4 Autòmats cel·lulars

2.4.1 Introducció

El modelatge de la majoria de sistemes físics, elèctrics i mecànics està basat en mètodes i expressions matemàtiques, les quals representen teòricament el comportament d'aquests sistemes. Generalment, per a modelar sistemes de naturalesa contínua, són utilitzades les equacions diferencials, les integrals funcionals i les variables d'estat, entre d'altres. Alguns procediments de discretització i digitalització de sistemes permeten realitzar anàlisis numèriques sobre models aproximats.

Una tècnica matemàtica complexa utilitzada per a modelar alguns sistemes físics i mecànics és el Mètode dels Elements Finites (FEM), la finalitat dels quals és discretitzar espais de naturalesa contínua, sobre els quals és possible realitzar anàlisis numèriques per a comprendre, per mitjà d'un model discret, el comportament de sistemes analògics. No obstant això, la complexitat d'aplicar FEM sobre alguns sistemes és tal, que resulta difícil assolir models que descriguin amb precisió els seus comportaments. FEM és d'àmplia utilització en anàlisi de sistemes i espais físic-mecànics on l'objectiu sigui comprendre la resistència de materials, la dinàmica de partícules i en general el comportament i la interacció dels elements base del sistema en l'espai; però queden encara molts sistemes complexos i de diversa naturalesa en els quals no és convencional aplicar aquesta tècnica, per exemple, sistemes químics, biològics, evolutius, genètics, elèctrics, computacionals i inclusivament altres físics i mecànics. Per al modelatge d'aquest tipus de sistemes queden encara tres opcions: Assolir un model de naturalesa contínua (en aquells sistemes analògics), en el qual es requereix expressions de funcions contínues; utilitzar mètodes aproximatius de discretització (no obstant, es tenen problemes de digitalització del model) o modelar amb un Autòmat Cel·lular.

Els Autòmats Cel·lulars són estructures ideals per a construir models digitals aproximatius d'alguns sistemes complexos de naturalesa contínua, sense passar per models analògics. És possible, per exemple, assolir senzills models digitals que representin amb suma fidelitat algunes lleis de la física.

2.4.2 Història

Els AC s'han 'inventat' en nombroses ocasions amb diferents noms i freqüentment diferents conceptes s'han utilitzat amb el mateix nom.

Els AC van ser introduïts a la fi dels anys 40 per *John von Neumann* seguint un suggeriment de *Stanislaw Ulam* amb l'objectiu de crear un model real del comportament de sistemes complexos. En un AC els objectes que poden ser interpretats com dades passives i els quals fan la funció de dispositius de computació es troben al mateix nivell i sotmesos a les mateixes lleis; computació i construcció són simplement dos models d'activitat de manera contrària als models convencionals de computació tals com la màquina de Tùring que fan una distinció clara entre l'estructura de l'ordinador (que és fixa) i les dades sobre els quals l'ordinador treballa (que són variables). L'ordinador no pot operar sobre la seva pròpia estructura, no pot modificar-se a si mateix ni construir altres ordinadors. Tot i que von Neumann era un físic i matemàtic excepcional, en el seu treball original hi ha una manca de consideracions físiques; el seu interès estava dirigit principalment a donar una explicació reduccionista de certs aspectes de la biologia. De fet els mecanismes que va proposar per a arribar a estructures autoreplicants, com es va descobrir posteriorment, s'assemblen bastant als que empren els organismes vius. De forma paral·lela a von Neumann l'enginyer alemany *Konrad Zuse* va desenvolupar el concepte d'AC. *Zuse* estava interessat en la construcció de models digitals de la Mecànica i els conceptes físics tenen un paper preponderant, no obstant això els seus treballs no van tenir tant impacte com els de von Neumann.

En els anys 60 *John Holland* va començar a aplicar els AC en problemes d'optimització i adaptació. A la vegada un gran nombre de matemàtics dirigien la seva atenció cap a les transformacions iteratives que actuen sobre estructures espacialment extenses i amb un conjunt discret d'estats. Qüestions importants sobre computabilitat i reversibilitat s'han estudiat per *Alvy Smith*, *Serafino Amorós* i *Victor Aladyev*.

El joc de la vida de John Conway que va aconseguir una gran popularitat gràcies a *Martin Gardner* es va convertir en un objecte de culte per a una generació de joves científics en els anys 70.

La qüestió de si els AC poden modelar només aspectes fenomenològics o si en canvi poden servir per a modelar les pròpies lleis Físiques va ser estudiada per *Edward Fredkin* i *Tommaso Toffoli* en els anys 80. El tema principal de la seva investigació és la formulació de que els models computacionals de problemes físics conserven la informació, retenint un dels ingredients principals de la física microscòpica que és el seu caràcter reversible.

Des del punt de vista de la Física i la Química l'estudi de models que redueixen fenòmens macroscòpics a processos microscòpics perfectament definits són d'un interès metodològic fonamental. Els simuladors d'AC són capaços d'actualitzar milions de cel·les en un temps extremadament curt i són una eina ideal en la construcció de models simples d'equacions diferencials com les equacions de la calor, de propagació d'ones o de *Navier-Stoke*. En particular els models d'AC s'utilitzen de forma regular en dinàmica de fluids. Finalment per a una de les branques de la Física que més s'està desenvolupant com és la dels sistemes dinàmics, l'aparició de fenòmens col·lectius, la turbulència, el caos o la fractalitat, els AC donen una rica i creixent col·lecció de models representatius d'aquests fenòmens, que poden ser aïllats i estudiats de forma senzilla. L'ús sistemàtic dels AC en aquest camp va ser iniciat per Stephen Wolfram a mitjans dels anys 80.

En conclusió podem dir que els AC han trobat un paper permanent com models conceptuals i pràctics de sistemes dinàmics espacialment distribuïts, dels quals els sistemes físics són els principals prototips. En l'actualitat, des de fa aproximadament una dècada, on el desenvolupament de models amb AC està mostrant més activitat és en el marc de la simulació urbanística: simulació de tràfic, usos del sòl, desenvolupament urbà, entre d'altres; i en la recerca de vida artificial.

2.4.3 Definició

Un autòmata cel·lular (AC) és un model matemàtic utilitzat per representar sistemes dinàmics mitjançant l'evolució en passos discrets. És molt utilitzat per modelar sistemes naturals que poden ser descrits com un conjunt de peces que interactuen entre elles mitjançant unes regles simples. Aquest model ens permet simplificar comportaments molt complexes a partir d'una dinàmica senzilla.

No hi ha una definició formal i matemàtica acceptada d'Autòmata Cel·lular però es pot descriure com una tupla, és a dir, un conjunt ordenat d'objectes caracteritzats pels següents components:

- ▷ Un espai bidimensional (*lattice*) dividit en cel·les amb les mateixes característiques cadascuna.
- ▷ Cada cel·la pot pendre un valor en \mathbb{Z} a partir d'un *conjunt finit d'estats* k .
- ▷ Un Veïnatge definit per a cada cel·la, el qual consisteix en un conjunt contigu de cel·les, indicant les seves posicions relatives respecte a la cel·la mateixa.

- ▷ Unes Regles d'Evolució, les quals defineix com canvia cada cel·la d'estat, depenent de l'estat immediatament anterior del seu veïnatge.
- ▷ Una Configuració inicial C_0 , la qual consisteix en assignar-li un estat a cada cel·la de l'autòmat.
- ▷ Un Rellotge virtual de còmput connectat a cadascuna de les cel·les, el qual generarà tics o polsos simultanis a totes les cel·les indicant quan han d'aplicar les regles d'evolució.

2.4.4 Condicions de frontera

Per definició, un AC consisteix en una *lattice* infinita de valors. No obstant, per qüestions pràctiques (models de sistemes físics portats a terme en ordinadors de memòria finita), es requereix prendre certes consideracions a l'hora d'implementar un AC en un sistema de còmput. És per això que la definició original es modifica per a donar cabuda a lattices finites. Això comporta a la consideració extra del que ha de succeir amb aquelles cel·les que es trobin en les vores de la *lattice*. A la implementació d'una o diverses consideracions específiques se li coneix com condició de frontera.

Dins de l'àmbit dels AC, es poden implementar nombroses condicions de frontera, d'acord al que el problema real requereixi per al seu modelatge:

- **Frontera oberta.** Es considera que fora de la *lattice* resideixen cel·les, totes amb un valor fix. En el cas d'AC amb dos estats en el seu conjunt k , una frontera es diu freda si les cel·les fora de la frontera es consideren d'estat 0 i calenta si es consideren 1.
- **Frontera periòdica.** Es considera a la *lattice* com si els seus extrems es toquessin. En una *lattice* de dimensió 1, això pot visualitzar-se en dues dimensions com una circumferència. En dimensió 2, la *lattice* podria visualitzar-se en tres dimensions com un toroide.
- **Frontera reflectora.** És considera que les cèl·lules fora de la *lattice* reflecteixen els valors d'aquelles de dintre de la *lattice*. Així, una cèl·lula que estigués al costat de fora de la vora de la *lattice* prendria com valor el de la cel·la que està al costat de dins de la vora de la *lattice*.
- **Sense frontera.** Fent ús d'implementacions que facin créixer dinàmicament l'ús de memòria de la *lattice* implementada, es pot assumir que cada vegada

que les cel·les han d'interactuar amb cel·les fora de la *lattice*, aquesta es fa més gran per a donar cabuda a aquestes interaccions. Òbviament, existeix un límit imposat per la memòria disponible per a aquesta condició. És molt important no confondre aquesta condició de frontera amb la definició original d'AC, que la seva *lattice* és inicialment infinita. En el cas d'un AC sense frontera, la *lattice* comença amb una grandària definida i finita, i conforme es requereixi va creixent en el temps, la qual cosa no ho fa necessàriament un model més proper a la realitat, doncs si s'inicialitzés la *lattice* aleatòriament, amb aquesta condició només es poden inicialitzar les cel·les dins de la *lattice* inicial finita, mentre que en el cas de la definició original, en teoria totes les cèl·lules de la *lattice* infinita haurien de ser inicialitzades.

2.4.5 AC multi-n-dimensionals

Un autòmat cel·lular multi-n-dimensional és una generalització de la definició d'AC. A l'expressió:

$$m : nAC^k \tag{2.4}$$

m és el nombre de capes de l'autòmat.

n és el nombre de dimensions de cada capa.

k és el nombre de capes principals, per defecte $k = 1$.

Per exemple, el famós AC anomenat *joc de la vida*¹ és un autòmat cel·lular representat per l'expressió $1 : 2AC$.

Un altre exemple és la informació d'un SIG, cada tipus de data es pot representar perfectament en una capa diferent d'un $m : nAC^k$. Tant dades vectorials (capes 2D) com dades raster (capes 3D) perfectament adequades. Totes les capes han d'estar referenciades geogràficament.

Un $m : nAC^k$ implementa un conjunt de regles que descriuen les seves transicions.

- ▷ Les capes que modifiquen el seu estat s'anomenen *capes principals*. El nombre màxim de *capes principals* és m i bé determinat pel valor de k . $1 \leq k \leq m$.
- ▷ La funció combinatòria ψ calcula l'estat de la capa principal. Aquest càlcul depen de l'estat de les altres capes de l'autòmat.

¹Aquest exemple està explicat a l'annex B

És clar que amb aquesta generalització dels AC un 1:n-AC (un AC amb una sola capa) és el mateix que un AC n-dimensional.

2.5 Validació, Verificació i Acreditació

2.5.1 Introducció

Una de les tasques més importants i complicades en la simulació és el procés anomenat Validació, Verificació i Acreditació del model (VV&A). Aquest és el procés que ens permetrà acceptar el model com a una representació creïble del sistema real.

El desenvolupament d'un model és un procés iteratiu on successivament el model es modifica per afinar millor els resultats. Cada etapa pot ser acceptada o descartada depenent dels resultats que n'esperem. Un model no es pot validar de manera general, s'accepta fins que es demostra el contrari. Tanmateix, un model pot ser vàlid per un propòsit i invàlid per un altre.

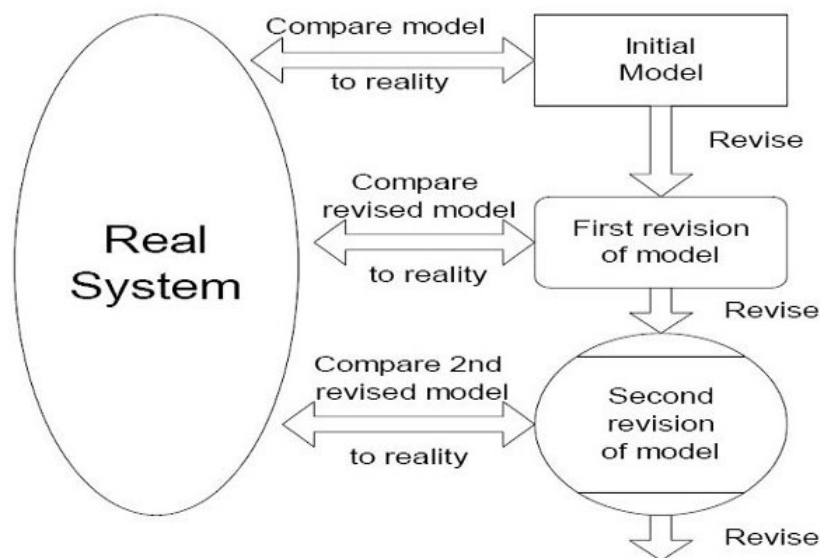


Figura 2.9: procés VV

La **verificació** es refereix a la construcció correcta d'un model. Es pot definir verificació com el procés de determinar si la lògica operacional del model (el programa implementat) correspon amb la lògica del disseny.

La **validació** es refereix a la construcció d'un model correcte. La validació és el procés de determinar si el model, com abstracció, és una bona representació de la realitat.

Normalment la validació s'aconsegueix mitjançant la calibració del model, en un procés iteratiu de comparació del comportament del model amb el sistema real i

analitzar les diferències per millorar el model. Aquest procés es repeteix fins que el model es considera acceptable.

2.5.2 Nivells de verificació i validació

Quan es construeix un model d'un sistema real s'atravessen una sèrie d'etapes o nivells de modelització. Es comença estudiant el sistema real i a continuació es construeix un model conceptual que conté tots els elements que es consideren rellevants del sistema. Tot seguit es segueix amb un model lògic que conté les relacions lògiques entre els elements. Per últim, es construeix el model de simulació i s'executa la lògica construïda a la fase anterior.

Quan es valida un model s'estableix que el model és una representació creïble del sistema real. En canvi, quan es verifica un model es determina que la lògica del model ha estat ben implementada. Aquestes tasques ténen objectius diferents i també ho són les tècniques per realitzar-les.

S'han d'establir una sèrie de criteris que serveixin per decidir si el model supera o no els processos de verificació i validació. S'ha de tenir en compte que en un model es poden excloure aspectes del sistema real que es creu que no són importants per respondre les preguntes plantejades.

Per construir el **model conceptual** es necessita identificar aquells elements del sistema real que s'inclouran en el model, així com els procediments que hi tindran lloc. En aquesta etapa s'han d'identificar variables exògenes i endògenes, els esdeveniments externs i les variables d'estat. Cal tenir present que la fase de VV comença des de la primera etapa de desenvolupament del model.

Una vegada s'ha construït el model conceptual, es passa a desenvolupar el **model lògic**, el qual incorpora els elements, els procediments i variables especificades al model conceptual. Aquest procés, el desenvolupament del model lògic, implica la primera revisió del model conceptual.

La fase següent és la construcció del **model de simulació**. S'ha de verificar que el programa no conté errors i que és una correcta representació del model lògic. Per acabar, s'ha de validar el model comprovant que és una correcta representació del sistema real.

Nivell de Modelització	Verificació	Validació
Model Conceptual		El model conté els elements, procediments i relacions rellevants? Podrà respondre a les qüestions plantejades?
Model Lògic	Estàn representats correctament els events? Les fórmules matemàtiques i les relacions són correctes? Estàn els estadístics formulats correctament?	El model inclou tots els elements considerats en el model conceptual? Conté totes les relacions del model conceptual?
Model de Simulació	Conté el codi de tots els aspectes del model lògic? Els estadístics i les fórmules es calculen correctament? Conté errors de codificació?	El model és una bona representació del sistema real? El model pot duplicar el comportament del sistema real? El model és creïble pels experts del sistema?

Taula 2.2: Verificació i Validació en els diferents nivells de modelització

2.5.3 Els tres passos de *Naylor i Finger*

Naylor i Finger (1967) van escriure un dels documents més importants sobre la validació en simulació. En el seu treball proposen tres passos a seguir per aconseguir uns bons resultats. Cal dir que és impossible garantir la absoluta validesa d'un model, tot i això, l'objectiu és aconseguir un model més representatiu i creïble del sistema real.

Desenvolupa un model vàlid i de qualitat

L'objectiu principal des dels primers passos ha de ser el de desenvolupar un model de qualitat. Per exemple, és important aconseguir un model on a primera vista sigui atractiu per les persones expertes en el sistema que s'està estudiant. Per aconseguir-ho, els desenvolupadors han d'obtenir la millor informació existent sobre el sistema.

Entrevistes amb experts del sistema. Un model de simulació no és sols un treball d'anàlisi per part del modelador, és molt important estar en contacte amb la gent que està realment familiaritzada amb el sistema. Rarament es podrà trobar una única font que contingui tota la informació necessària per construir el model. La tasca de recolectar tota la informació sobre el sistema és molt valuosa, encara que mai s'aconsegueixi reproduir el model correctament.

Observació del sistema. Si existeix un sistema igual o semblant al que es vol modelar, serà una font d'informació privilegiada per la construcció correcta del model. La informació pot provenir de resultats històrics o bé es poden obtenir durant el procés d'estudi del sistema. És important comprovar que les dades siguin

correctes (sense errors), en un format vàlid i que representin el que s'està modelant. Cal tenir en compte que els sistemes poden variar i fer que les dades històriques siguin invàlides.

Fonts teòriques. Trobar models teòrics que siguin representatius del sistema en estudi pot simplificar el procés d'abstracció. Per exemple, si es vol modelar el trànsit de persones que arriben a un banc on l'interval entre arribades és constant, la teoria ens diu que els clients arriben segons un procés de *Poisson*.

Resultats d'altres models de simulació. És possible que s'hagin desenvolupat models semblants al del sistema estudiat. Els resultats poden ser utilitzats sempre que compleixin un mínim de validesa.

Experiència i intuïció A vegades és necessari l'experiència o la pròpia intuïció per evaluar com opera un sistema complex, sobretot quan es desconeixen els mecanismes interns del sistema i s'han de formular hipòtesis. Cal tenir en compte que aquestes hipòtesis poden ser replantejades en qualsevol fase de validació.

Experimenta amb el model empíricament

L'objectiu d'aquest segon pas és validar quantitativament els resultats del model. Una de les tècniques més útils durant aquesta fase de validació és l'*anàlisi de sensibilitat*. Aquest és usat per determinar si els resultats de la simulació varien substancialment quan els valors d'entrada o la resolució canvia. Si hi ha alguna part que és molt sensible i pertant, modifica notablement els resultats de sortida, s'ha de modelar detingudament.

Quan es fa un anàlisi de sensibilitat també s'ha de tenir en compte si el model utilitza una font de números aleatoris. En aquest cas, s'haurà de controlar com afecta aquesta aleatorietat, en cas contrari, l'efecte que pot causar es pot confondre amb altres variacions de les dades d'entrada.

Determina si els resultats són representatius

El test definitiu de validació ha d'establir el grau de representativitat del model. En altres paraules, ha de determinar com s'assemblen els resultats del simulador i els resultats del sistema real. Si el sistema real existeix i els resultats es poden quantificar, s'utilitzaran per comparar-los amb els del model desenvolupat. Si els dos conjunts de dades són suficientment semblants, podrem considerar el model com a vàlid. En tot cas, considerar si dos resultats s'assemblen és un acte poc precís, finalment, el més important és que el simulador compleixi els requisits proposats

inicialment.

2.5.4 Validació per *Caixa Negra*

El nom de la tècnica de validació *Caixa Negra* ve donat perquè el model és tractat com una caixa que accepta valors d'entrada i els transforma en sortida sense conèixer res del que passa dins la caixa. L'objectiu d'aquest test és determinar si el model representa el sistema amb suficient precisió.

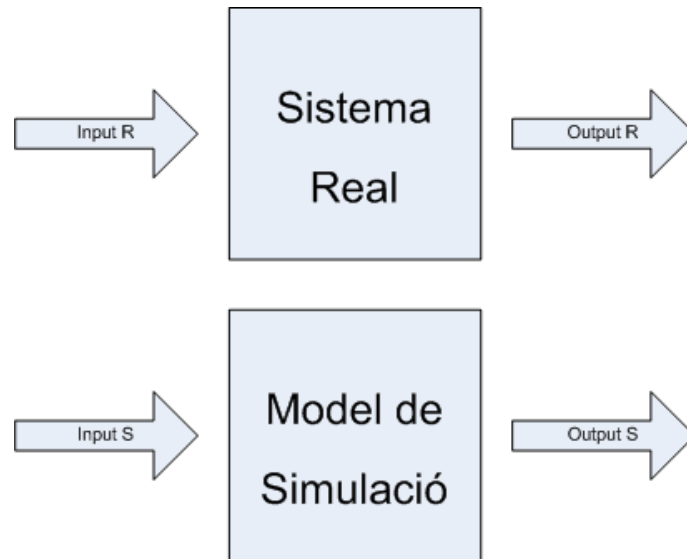


Figura 2.10: Mètode de validació per caixa negra

Tal com mostra la figura 2.10, es tracta de comparar els resultats del sistema real amb els del model de simulació sense parar atenció amb els procediments interns. En aquest cas caldrà validar la hipòtesis:

Si $I_s = I_r$, llavors $O_s = O_r$

2.5.5 Test de *Túring*

Originàriament, el Test de *Túring* és un procediment desenvolupat per *Alan Turing* el 1950 per identificar l'existència d'intel·ligència en una màquina i comprobar que una màquina pot arribar a pensar igual que una persona. En el marc de la validació, el test de *Túring* és un mètode de validació subjectiu. Quan no es poden emprar dades del sistema real o aquestes són difícils d'obtenir o poc fiables, aquest mètode és una bona alternativa.

El test consisteix a produir dades de sortida exactament amb el mateix format que el sistema real. Aquests informes obtinguts amb el simulador, seran presentats a experts en el sistema juntament amb informes produïts pel sistema real. Quan menor sigui el nombre d'informes falsos detectats, més validesa obté el model de simulació.

Tot i que no és l'objectiu d'aquest projecte, s'intentaran obtenir resultats que facilitin la futura preparació d'un test de *Turing*. En el cas de les allaus, aquest pot ésser un test molt útil. Normalment, els informes d'allaus reals no són prou precisos per realitzar una validació rigorosa del model.

Capítol 3

Anàlisi del model

3.1 Introducció

En una primera aproximació al model de *Simulador d'allaus* s'analitzaran els objectius inicials de la construcció del model. Cal tenir en compte que els objectius poden canviar durant el transcurs de desenvolupament i és per això que durant un procés de *verificació i validació* el primer pas és comprovar que aquests objectius continuen essent vàlids.

Per determinar si els objectius podran ésser complerts caldrà comprovar si el model conté tots els detalls necessaris per cobrir-los. És possible que un model s'hagi de replantejar des de l'arrel; el procés de validació és una part integral del procés de desenvolupament del model i com en qualsevol procés d'enginyeria, si durant una fase es detecta una invalidesa, s'ha de retrocedir a la fase anterior.

3.2 Requisits del model

Els requisits del model són totes aquelles funcionalitats que ha de complir el model. Amb altres paraules, és l'objectiu de perquè es vol construir el model. Els requisits són difícils de definir, sobretot a l'inici del desenvolupament quan es desconeix la lògica del model. Així, per especificar els requisits d'un model, pot ser útil partir d'una definició descriptiva del model. En el cas del simulador d'allaus:

El model proposat pretén simular el flux de l'allau des del moment inicial que es produeix el trencament fins que l'allau s'atura. La simulació ha de poder incorporar dades reals del territori i també haurà de mostrar dades descriptives de l'allau simulada.

Per altra banda, per afegir precisió a la descripció, és important que s'acompanyi de les directives funcionals que el model ha de complir. Aquests són els requisits que formen el propòsit del model:

- ▷ Importar diferents tipus de dades geogràfiques, reals o no, al sistema, per tal de generar un escenari virtual on es pugui realitzar la simulació del fenomen.
- ▷ Definir la localització exacta del desencadenament de l'allau en l'escenari.
- ▷ Executar el model de simulació quan l'usuari ho demani.
- ▷ Representar gràficament l'escenari i el fenomen en tres dimensions.
- ▷ Extreure estadístiques i informació sobre l'allau generat.

Aquesta és una definició dels requeriments molt subjectiva i poc precisa; sobretot pel que fa als estadístics i dades sobre l'allau que el model ha de calcular. De totes maneres, els resultats obtinguts sobre l'allau haurien de complir dos propòsits:

- ▷ Han de ser útils pels usuaris del simulador. En el cas del simulador d'allaus, es pot tractar d'informació valuosa però difícilment calculable durant els experiments reals.
- ▷ Han de ser suficient per una bona validació operacional del simulador. Els resultats obtinguts han de ser comparables amb resultats obtinguts d'allaus reals. La comparació amb el sistema real és necessària per una bona validació del model.

3.3 Estructura del model

Aquest és un model de flux d'allaus que utilitza un autòmat cel·lular bidimensional d' m capes no probabilístic. Segons la definició de la secció 2.4.5, aquest es pot expressar com:

$$m : 2AC \tag{3.1}$$

D'aquesta manera el flux de l'allau es discretiza en cèl·lules o blocs del mateix tamany. El tamany de la cel·la o resolució del *lattice* de l'AC és una característica molt important i dependrà de la resolució de les dades geogràfiques que s'introdueixin al model.

La descripció completa de l'AC és a la secció 4.1.

3.4 Validesa de les dades

Les dades que s'utilitzaran en el model són dades geogràfiques provinents de diverses fonts. La informació més important i la que definirà la resolució amb què treballarà el model és la de les alçades. Aquesta serà la principal limitació del model. Tot seguit es descriuen les dades més importants que s'incorporen al model:

Dades de les altures : Les dades sobre el relleu del terreny són dades molt valuoses. L'altura en metres d'un conjunt de punts del terreny no és un valor fàcil de mesurar, tanmateix, això fa que sigui molt difícil aconseguir dades amb una resolució baixa.

Tipus terreny : Aquestes dades es refereixen al tipus de sòl de l'àrea d'estudi. Sovint les dades del terreny seran aproximacions basades en informes descriptius de l'àrea. Tot i això, les dades del terreny que més influeixen en el model són les de la vessant on l'allau hi té lloc. En la majoria dels casos el tipus de terreny de la vessant és neu i per tant, només caldrà determinar el tipus de neu que hi havia en el moment de produir-se l'allau.

Gruixos de neu : Les dades sobre els gruixos de neu determinen el gruix de la placa de neu que es desplaçarà vessant avall. Durant els experiments de les allaus provocades, equips especialistes mesuren la profunditat de la neu abans de provocar una allau. D'aquesta manera es pot aconseguir una bona aproximació del gruix de la placa.

Tal com s'ha dit, el conjunt de dades més importants pel model són les que descriuen el relleu del terreny. Així, pot ser molt interessant veure com afecta en els resultats un canvi de resolució d'aquestes dades.

Capítol 4

Especificació del model

4.1 Especificació de l'AC

4.1.1 Conjunt d'Estats

Cada cel·la pot estar en un estat del conjunt d'estats possibles. El conjunt d'estats ha de ser forçosament finit. Per representar-ho matemàticament definirem la funció $x_i(t)$ que representa l'estat de la cel·la que ocupa la posició i en l'instant t .

$$x_i(t) \in \{0 \text{ (Buit)}, 1 \text{ (Dinàmic)}, 2 \text{ (Estàtic)}\}$$

Abans de definir els tres estats cal definir el que entenem per neu *movible*. La neu *movible* és la massa de neu d'una cel·la que pot formar part d'una allau. En canvi, la neu que no és *movible* la considerarem suficientment cohesionada i sols formarà part del terreny per on l'allau es mourà, mai formarà part d'aquesta.

Buit La cel·la no conté neu *movible*. $x_i(t) = 0$.

Dinàmic La cel·la conté neu *movible* que es pot desplaçar a una altra cel·la en el següent pas. $x_i(t) = 1$

Estàtic La cel·la conté neu *movible* que romandrà a la mateixa cel·la en el següent pas. $x_i(t) = 2$.

4.1.2 Capes de dades

A part de l'estat, cada cel·la té associada la informació geogràfica necessària per aplicar les regles d'evolució. Així, a més de la capa que emmagatzema la infor-

mació de l'estat de la cel·la, tindrem altres capes amb les mateixes dimensions que contindran altra informació.

A continuació es descriuen les capes que defineixen l'AC i que s'utilitzen durant la simulació:

Capa d'estats Aquesta capa emmagatzema l'estat de la cel·la en l'instant actual. Els estats possibles són els definits a la secció 4.1.1.

Capa d'altures Conté l'altura geogràfica de la cel·la en metres. Aquesta capa no conta l'altura del gruix de neu *movible*.

Capa del terreny Descriu mitjançant una numeració el tipus de terreny de cada cel·la de l'escenari. El tipus de terreny ens servirà per coneixer el coeficient de fricció de la superfície.

- ▷ 0 Neu pols
- ▷ 1 Neu dura
- ▷ 2 Gel
- ▷ 3 Grava grollera
- ▷ 4 Grava fina
- ▷ 5 Vegetació suau
- ▷ 6 Vegetació mitja
- ▷ 7 Vegetació densa
- ▷ 8 Aigua

Capa de gruixos Aquesta capa emmagatzema el gruix la neu *movible* en metres.

Capa del trencament Aquesta és una capa vectorial que representa el trencament de l'allau.

Capa del camí Aquesta capa indica si la cel·la ha format part del camí de l'allau. Es modifica durant la simulació.

4.1.3 Veïnatge

El veïnatge d'una cel·la de l'AC és el conjunt de cel·les amb les quals pot interactuar directament. En aquesta cas, s'ha definit un Veïnatge de Moore de radi 1 que consisteix en la pròpia cel·la més 8 cel·les contingents a aquesta.

Si definim una matriu de n files i m columnes i enumerem cada cel·la de manera creixent d'esquerra a dreta i de dalt a baix, el veïnatge de la cel·la i serà:

$$V(i) = \{i - m - 1, i - m, i - m + 1, i - 1, i, i + 1, i + m - 1, i + m, i + m + 1\}$$

i els estats del conjunt de cel·les del veïnatge:

$$x_V(t) = \{x_{i-m-1}(t), x_{i-m}(t), x_{i-m+1}(t), x_{i-1}(t), x_i(t), x_{i+1}(t), x_{i+m-1}(t), x_{i+m}(t), x_{i+m+1}(t)\}$$

A l'exemple següent es mostra el veïnatge de la cel·la número 5 on $m = 4$.

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 & 7 \\ 8 & 9 & 10 & 11 \\ 12 & 13 & 14 & 15 \end{pmatrix}$$

4.1.4 Condicions de Frontera

Considerarem que la matriu de l'autòmat té una frontera oberta, on les cel·les de l'altra banda de la frontera són de l'estat *Buit* i ofereixen una força de resistència infinita al lliscament de masses de neu, per tant, no podran rebre mai massa de neu de placa i el seu estat sempre serà el mateix. Una cel·la de dins de la frontera que hagi de propagar el desplaçament d'una massa de neu fora d'aquesta anularà el seu moviment ja que toparà amb aquesta gran resistència i, d'aquesta manera, la massa romandrà estàtica a la cel·la.

4.1.5 Configuració inicial

La configuració inicial de l'AC bé determinada per l'escenari on tindrà lloc la simulació. Les capes de dades que s'importen per crear l'escenari són les que marcaran l'estat de cada cel·la. Així, tenint en compte les capes definides a la secció 4.1.2, l'estat inicial de les cel·les serà el següent:

- ▷ Una cel·la estarà en estat *Dinàmic* si a més de tenir gruix de neu *movible*, també forma part del trencament introduït per la capa de trencament.
- ▷ Una cel·la estarà en estat *Estàtic* si conté gruix de neu *movible* però no forma part del trencament.
- ▷ Una cel·la estarà en estat *Buit* si no conté gruix de neu *movible*.

4.1.6 Regles d'Evolució

Des del moment inicial on es produeix el trencament i l'allau comença a formar-se fins a l'instant que l'allau s'atura podem diferenciar dos fenòmens independents:

Fase de propagació de la fractura Al produir-se la fractura, primerament es produeix el fenomen d'extensió d'aquesta fractura.

Fase de lliscament de la massa Durant aquesta fase, la massa després per la fractura es desplaça vessant avall.

D'aquesta manera, la simulació començarà a la primera fase fins que no es pugui estendre més l'escletxa i seguidament començarà la segona fase.

Propagació de la fractura

Durant la primera fase, tota cel·la en estat *Dinàmic* propagarà la fractura a la cel·la veïna de menor alçada en estat *Estàtic*, sempre que la seva alçada sigui menor. Si alguna cel·la del veïnatge compleix la regla, aquesta passa a estat *Dinàmic* i segueix propagant l'escletxa. La cel·la d'origen no canviarà d'estat.

A la figura 4.1 tenim un exemple il·lustrat. La representació és la següent: les cel·les de color gris representen cel·les amb neu *movible*, les cel·les de color magenta representen les cel·les de la fractura inicial i finalment, després de la fase de propagació, les cel·les de color rosat queden en estat *Dinàmic* i formaran part de l'allau a la següent fase. La fletxa indica el sentit del pendent.

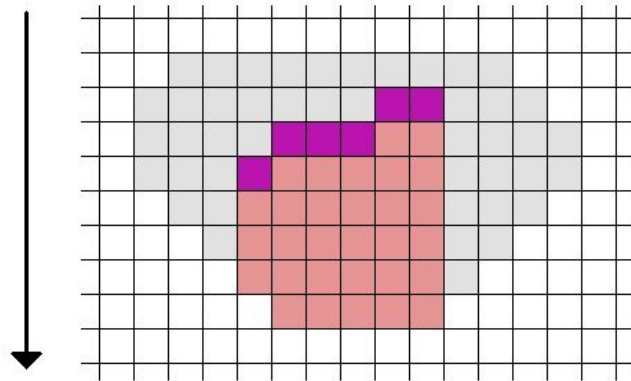


Figura 4.1: Propagació de la fractura

El procediment és el representat a l'algoritme 6. La funció $x_i(t)$ retorna l'estat de la cel·la i a l'instant t , la funció $h_i(t)$ l'altura i la funció $trenc_i(t)$ el seu valor a

la capa de trencament. Considerarem que aquesta fase de propagació de la fractura transcorre en temps 0.

Algoritme 1 Algoritme utilitzat per propagar la fractura

```

if  $x_i(t) = 1$  and  $trenc_i(t) = 1$  then
     $desti_i(t) := \{j \in V_i(t) | h_j(t) = \min(h_{i-m-1}(t), h_{i-m}(t), h_{i-m+1}(t), h_{i-1}(t), h_i(t), h_{i+1}(t),$ 
     $h_{i+m-1}(t), h_{i+m}(t), h_{i+m+1}(t))\}$ 
     $x_j(t) = 1$ 
     $trenc_j(t) := 1$ 
     $trenc_i(t) := 0$ 
end if

```

Lliscament de la massa

Durant la fase de Lliscament, tota cel·la estat *Dinàmic* desplaça la seva massa de neu movable en el cas que pugui fer-ho. A l'hora de determinar la cel·la cap on la cel·la origen desplaçarà la seva massa, cal diferenciar dos casos:

- ▷ $t = 0$ i la massa està iniciant el moviment. En aquest cas la cel·la destí serà la cel·la veïna de menor alçada sempre que aquesta sigui menor que l'alçada de la cel·la origen.
- ▷ $t > 0$ i la massa està en moviment ($vel > 0$). Quan la massa està en moviment, aquesta només es podrà desplaçar cap a una de les tres cel·les veïnes que queden oposades a la direcció d'on prové la massa. A més, degut a la inèrcia, la massa té més possibilitats de seguir recte que de bascular 45° . Aquest cas queda més ben representat a la figura 4.2. A la figura es mostren dos possibles camins de dues allaus diferents. En el primer cas la direcció és en diagonal cap a baix a la dreta i en el segon la direcció és de dalt a baix. En blau més clar es mostren les possibles cel·les destí.

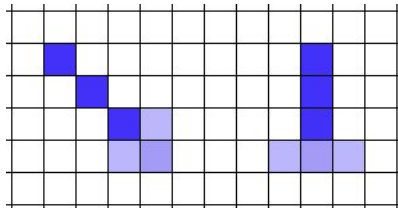


Figura 4.2: Cel·les destí d'una cel·la origen en moviment

Un cop es troba la cel·la destí cal calcular les magnituds físiques amb què hi arribarà la massa. Aquests càlculs s'especificaràn a la següent secció 4.2. L'algoritme finalment serà l'especificat a continuació:

Algoritme 2 Algoritme utilitzat durant la fase de lliscament de la massa

```

if  $x_i(t) = 1$  then
  if  $t = 0$  then
     $desti_i(t) := \{j \in V_i(t) \mid \text{menor alçada del veïnatge}\}$ 
  else
     $desti_i(t) := \{j \mid \text{és una de les tres posicions oposades a l'origen del moviment}\}$ 
  end if
  Actualitzar dades de les cel·les  $i$  i  $j$ 
   $x_j(t) := 1$  {La cel·la destí passa a estat Dinàmic}
   $x_i(t) := 2$  {La cel·la origen passa a estat Estàtic}
end if

```

4.2 Hipòtesis del model

Durant el procés de modelatge s'estableixen diverses hipòtesis de treball. Es definiran dos tipus d'hipòtesis, les *inicials* i les *operacionals*.

4.2.1 Hipòtesis inicials

Les hipòtesis inicials donen informació més precisa sobre el sistema a modelar, normalment serveixen per acotar-lo. Tot seguit s'esmentaran les hipòtesis considerades durant la construcció inicial del model:

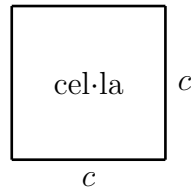
- ▷ El tipus d'allau escollit ha estat l'allau de placa.
 - Una allau de placa es desencadena a partir de la discontinuïtat en la cohesió de la massa de neu de forma perpendicular al sentit del vessant. La sortida d'una allau de placa mai serà puntual sinó lineal.
 - Degut al pes de la massa de neu, la qual ha perdut una de les seves principals sustentacions, la escletxa es propaga pels extrems de la línia de fractura inicial paral·lelament al sentit del pendent.
 - Iniciat el lliscament de la massa de neu, aquesta mai es dispersa en sentit perpendicular al desplaçament.
 - La principal força de resistència al lliscament serà el fregament de la massa en moviment amb la neu subjacent o el sòl. Existiran, en menor grau, unes forces de resistència internes de la neu degut als canvis de cohesió i col·lisions dels blocs.
 - En aquest tipus d'allau, la fricció amb l'aire o amb els fluids són irrelevantes.
- ▷ No s'han considerat els efectes que puguin causar fenòmens meteorològics durant el transcurs de l'allau.
- ▷ La representació i els resultats obtinguts es veuran limitats per la resolució geogràfica utilitzada en la simulació.

4.2.2 Hipòtesis operacionals

Quan un sistema es desconeix com opera s'han de formular hipòtesis per tal d'aproximar al màxim el seu funcionament. Aquestes hipòtesis sovint s'han de replantejar a cada fase de validació. Les hipòtesis es consideren vàlides fins que es considera el contrari.

Força impulsora (F_i)

L'element principal del model és una cel·la amb gruix de neu movable.



on c bé determinat per la resolució de les dades utilitzades. El gruix s'obté a partir de la capa de gruixos de neu movable i la densitat de la neu de placa es considerarà constant amb $\rho_{neu\,placa} = 0.500 \frac{kg}{m^3}$. Finalment calcularem la massa:

$$m = c^2 \cdot gruix \cdot \rho_{neu\,placa} \quad (4.1)$$

La massa de neu de les cel·les de trencament reben una força produïda pel seu pes tal com es representa a la figura 4.3.

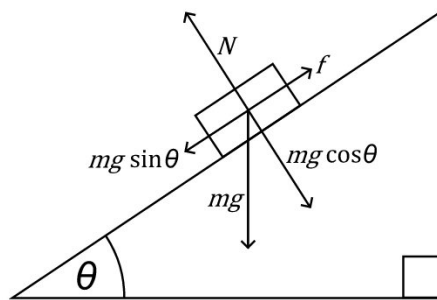


Figura 4.3: Cos lliure en un pla inclinat

Per calcular la força impulsora cal coneixer l'angle θ .

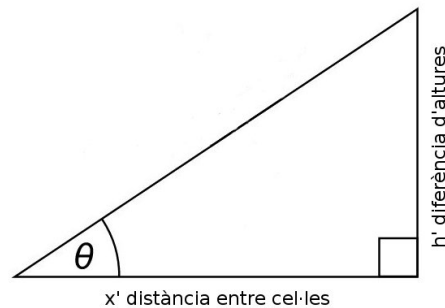


Figura 4.4: Càlcul del pendent

On la diferència d'altures es calcularà a partir de les dades de la capa d'altures. La distància entre les cel·les pot variar segons el cas: si les dues cel·les es toquen per un dels costats la distància serà igual a c , sinó la distància serà $\sqrt{2}c$.

$$\theta = \arctan \frac{h'}{x'} \quad (4.2)$$

I finalment la força impulsora F_i serà:

$$F_i = m \cdot g \cdot \sin \theta \quad (4.3)$$

Força de resistència per fregament (F_r)

La fricció entre dos cossos provoca una força de resistència directament proporcional al pes del cos en moviment. En el cas de l'allau considerarem com si aquesta estés formada per petits cossos del tamany d'una cel·la. La massa que conté la cel·la es comportarà com un sòlid i per tant es provocarà una fricció amb la superfície.

Hi ha diverses teories a l'hora de determinar el coeficient de fricció dinàmic (μ_f) en una allau. Les equacions de Voellmy¹ afirmen que probablement varia entre 0.1 i 0.3 depenent de la velocitat puntual de l'allau. Una relació entre la velocitat i el coeficient de fricció força acceptada entre els investigadors és $\mu_f = \frac{5}{V_{el}}$ acotant els valors entre 0.1 i 0.8. Aquesta hipòtesis ha estat probada en el simulador donant resultats molt irregulars. En concret, aquesta relació és molt bona en allaus de grans dimensions on s'adquirien velocitats altes però en canvi, en allaus lentes on la vessant presentava poca inclinació, les simulacions no eren vàlides.

Una altra hipòtesis en el càlcul del coeficient de fricció és la d'utilitzar coeficients de fricció mitjans depenent del tipus de terreny. El tipus de terreny és molt influent i aquesta hipòtesis ha donat molts bons resultats en tot tipus d'allaus i perfils de vessants.

A la secció 4.1.2 s'han definit els tipus de superfície que pot contenir la capa de terreny. A la taula 4.5 es defineixen els coeficients de fricció per cada una de les superfícies. Normalment les allaus es definiran sobre neu pols o neu dura.

Per obtenir el coeficient de fricció es consultarà la capa de terreny de la cel·la corresponent. Després es calcularà la Força Normal (F_N) i es multiplicarà pel valor de μ .

¹La base teòrica de les dinàmiques d'allaus en anàlisis a Europa i Nord Amèrica van ser estudiades per Voellmy (1955)

id	Superfície	(μ_f)
0	Neu pols	0.5
1	Neu dura	0.4
2	Gel	0.2
3	Grava grollera	0.9
4	Grava fina	0.7
5	Vegetació suau	0.6
6	Vegetació mitja	0.65
7	Vegetació densa	0.8

Figura 4.5: Coeficient de fricció per a cada terreny

$$F_N = m \cdot g \cdot \cos \theta \quad (4.4)$$

$$F_r = \mu_f \cdot F_N \quad (4.5)$$

Força de resistència interna (F_{r2})

Les altres forces de resistència hi intervenen són les provocades pels propis canvis de cohesió de l'allau. La forma dels components de l'allau canvia durant el seu transcurs i es formen forces de resistència provocades pel roçament amb l'aire i les torbulències dins la pròpia allau.

En el cas de les allaus de placa la neu està consolidada fortament. Abans de l'inici de l'allau la majoria de la massa de neu està aparentment composta per blocs relativament grans (probablement de 10 a 100 cm de llargada). Aquests blocs llisquen, giren, boten i col·lisionen entre ells però a causa de la seva gran grandària i la seva gran velocitat els grans de neu mai arriben a estar en suspensió. La massa es mou com si fos una cascada de blocs de neu discrets i l'allau mai arriba a esdevenir *fluxe*.

Aquestes forces de resistència ténen poca importància en els allaus de placa. Tanmateix el seu càlcul és complex i poc precís. En el model d'allaus de placa es representaran aquestes forces com una penalització de la força impulsora (F_i).

$$F_{r2} = F_i \cdot K_p \quad (4.6)$$

El coeficient K_p serà una de les dues variables que es calibraran durant els ex-

periments de validació.

Força total resultant

Finalment la força total serà la resultant de restar les forces de resistència a la força impulsora:

$$F_T = F_i - F_r - F_{r2} \quad (4.7)$$

Canvis de direcció i moment lineal

Si analitzem l'allau com una gran massa que es mou a una velocitat cal tenir en compte que aquesta exerceix certa resistència als canvis de direcció. Un cos en moviment tendeix a seguir recte, aquest efecte es defineix com *moment lineal*, el que vulgarment s'anomena *inèrcia*. Aquests canvis de direcció depenen directament de la *quantitat de moviment* (\vec{p}). Matemàticament es defineix com la magnitud vectorial resultant del producte de la massa del cos i la seva velocitat:

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v} \quad (4.8)$$

El problema plantejat és el de com representar aquest efecte en el model. El model d'AC no és probabilístic i determina la cel·la destí únicament comparant les alçades de les cel·les candidates.

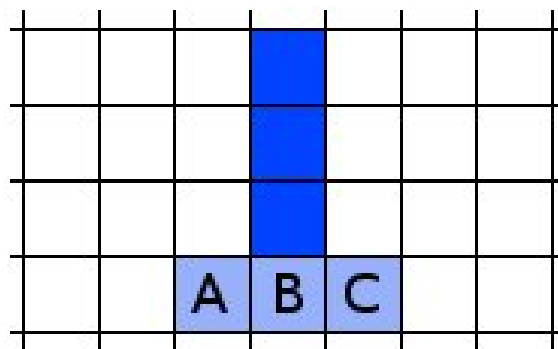


Figura 4.6: A: 2005.5m, B: 2007m, C: 2006m

A la figura 4.6 hi ha un possible exemple. El destí amb l'alçada més baixa és la cel·la A però la *quantitat de moviment* acumulada pot fer que la massa segueixi recte. Per tant, a l'hora de pendre la decisió de quina és la cel·la menor, podem considerar

que la cel·la central té una altura menor a la real. La diferència entre l'altura real i la considerada a l'hora de pendre la decisió l'anomenarem ∇h . Finalment definirem K_i com el *coeficient d'inèrcia* que serà la constant que determinarà ∇h :

$$\nabla h = K_i \cdot m \cdot v \quad (4.9)$$

El coeficient K_i serà l'altra variable que es calibrarà durant els experiments de validació.

Pèrdues de neu

Cal tenir en compte que durant el transcurs de l'allau la massa de neu transportada va disminuint. El càlcul de la massa perduda a cada desplaçament és una tasca complexa. Cal determinar quins són les variables més representatives en aquest càlcul i calcular-ne la proporció.

Analitzant casos d'allaus de placa reals, veiem clarament que la major part de la massa de neu transportada queda dipositada al tram final d'aquesta. De totes les mètriques estudiades en el model, podem reduir el conjunt de variables representatives a dues: la velocitat i la força (F_T).

És clar veure que a la zona de dipòsit (tram final) de l'allau és on la **velocitat** de la massa transportada és més baixa, per tant, la velocitat té una relació inversament proporcional al gruix de neu perduda. Tot i això, aquesta és una mètrica independent a les condicions del terreny. La velocitat puntual pot ser semblant a diferents instants de l'allau i en canvi mostrar condicions totalment diferents. No és el mateix durant l'inici de l'allau que durant la fase final, en canvi les velocitats que es presenten són bastant semblants.

Així la **força** (F_T) serà el paràmetre que ens descriurà millor l'estat actual de l'allau. Indirectament la F_T ens dona informació sobre l'acceleració, la massa i el pendent. Tanmateix, podem deduir que el moment on les pèrdues de neu són majors és durant la desacceleració de l'allau, és a dir, quan es presentin valors negatius de F_T .

L'expressió utilitzada pel càlcul del gruix de neu perduda és la següent:

Es considerarà que el gruix perdut durant la fase d'acceleració de la massa és massa petit per ésser considerat.

Algoritme 3 Algoritme pel càlcul del gruix de neu perdut

```
if  $F_T < 0$  then
     $perdua = gruix \cdot 0.05$ 
else
     $perdua = 0$ 
end if
```

Càlcul de la velocitat

Un dels canvis més importants que s'han fet al simulador és el d'incorporar temporalitat a la simulació. Així, s'ha passat d'un model basat amb les forces i passos a un altre basat amb velocitats i temps. Aquest canvi ha estat necessari per poder extreure més estadístics resultants de les allaus.

El procés de calcular la velocitat es farà a cada moviment de neu entre cel·les veïnes. Per aquest càlcul necessitarem conèixer en tot moment l'instant inicial en que comença el desplaçament (t_0), la velocitat inicial (V_0) i la massa de neu (m). A partir d'aquests paràmetres es coneixarà l'instant en què arribarà la neu a la cel·la destí (t_f) i la velocitat final (V_f).

Inicialment, calcularem l'acceleració que rep la massa de neu. La F_T ha estat descrita a l'equació 4.7.

$$a = F_T/m \quad (4.10)$$

$$t_f = t_0 + \frac{-V_0 \pm \sqrt{V_0^2 - 2ax}}{a} \quad (4.11)$$

On x ve determinat pel tamany de la cel·la i la direcció de la cel·la destí. Un cop es coneix el temps es pot calcular la velocitat amb què la massa arribarà a la cel·la destí:

$$V_f = V_0 + a(t_f - t_0) \quad (4.12)$$

4.3 Especificació en SDL

Un cop descrita l'estructura de l'AC, cal especificar el model. Mitjançant el llenguatge SDL modelarem el comportament del conjunt de cel·les i dels components que controlen la simulació.

SDL (Specification and Description Language) és un llenguatge d'especificació formal i visual, formulat per la ITU-T en l'estàndard Z.200, dissenyat per a l'especificació de sistemes complexos, interactius, orientats a esdeveniments, de temps real o que presentin un comportament paral·lel, i on mòduls o entitats independents es comuniquin per mitja de senyals per a efectuar la seva funció. Una especificació SDL està formada pels següents elements:

- Estructura (Blocs, Processos, Serveis)
- Comunicacions (Senyals, Canals de comunicació)
- Comportament
- Dades
- Relacions d'herència

4.3.1 Sistema

El sistema es compon de diferents blocs.

- ▷ **L'entorn** és el bloc que gestiona la interacció entre l'usuari i el simulador, enviant-li al motor la configuració inicial, el moment que iniciarà l'execució, etc.
- ▷ **El motor** és el bloc que coordina i guia el procés de simulació.
- ▷ **El rellotge** és el component que determina quan ha d'actuar el motor.
- ▷ **El grid**, que **estarà compost per N instàncies del bloc cel·la**. El nombre de cel·les dependrà de les dimensions i el detall del terreny a simular.

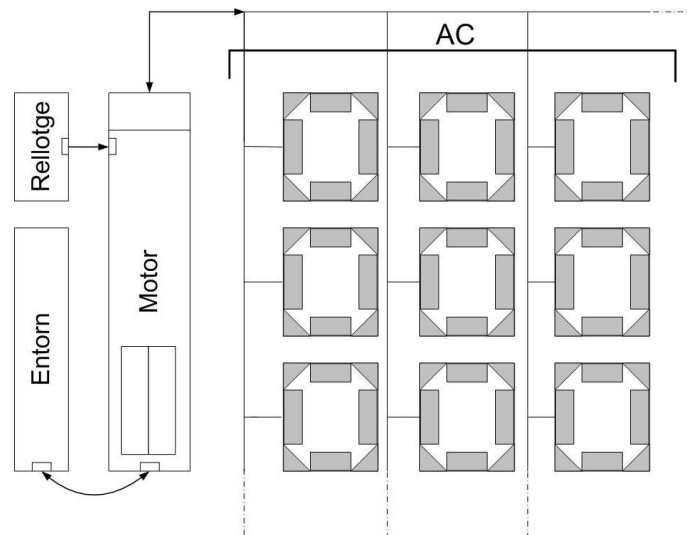


Figura 4.7: Diagrama del sistema

La part més important del sistema és el **bloc cel·la**. Aquest bloc és el que descriu el comportament del model, a continuació s'especificarà en detall aquest bloc.

4.3.2 Bloc cel·la: Diagrama d'estats

Una cel·la emmagatzemarà diverses capes d'informació geogràfica, algunes de les quals poden ser modificades en temps d'execució. No obstant totes aquestes dades dependran de la capa principal. Un canvi d'estat en una cel·la, en una determinada actualització, es pot produir segons un esdeveniment (senyal enviada d'una cel·la a altra o a si mateixa).

Els 3 possibles estats d'una cel·la són:

- ▷ **Buit:** La cel·la no conté cap gruix de neu movable.
- ▷ **Dinàmic:** La cel·la conté massa de neu movable que es pot desplaçar a una cel·la veïna en la següent actualització del rellotge segons les regles d'evolució.
- ▷ **Estàtic:** La cel·la conté massa de neu movable que romandrà a la mateixa cel·la en la següent actualització del rellotge, es a dir, no se li aplicaran les regles d'evolució en la iteració actual.

L'únic tipus d'esdeveniment que canviarà l'estat de les cel·les en la fase de propagació serà l'anomenat *Fracturar*, que serà enviat, primerament a les cel·les que pertanyin a la línia de trencament (configuració inicial de l'AC) i, en successives iteracions, a les cel·les veïnes destí calculades segons la regla d'evolució. Una cel·la en

estat *Estàtic* que rebi un esdeveniment *Fracturar* canviarà a l'estat *Dinàmic*, mentre que si el rep una cel·la en estat *Buit* o *Dinàmic* no tindrà cap efecte i romandrà en el mateix estat.

Durant la fase de lliscament hi tenen lloc tres tipus d'esdeveniment: **Desplaçar**, **Enviar** i **Rebre**.

L'esdeveniment *Desplaçar* serà enviat a tota cel·la de l'autòmat en estat *Dinàmic* perquè propagui el lliscament a alguna cel·la del seu veïnatge. L'esdeveniment *Enviar* serà enviat, passada l'etapa de càlculs, a totes les cel·les dinàmiques descartant les que no propaguen el lliscament. Per últim, *Rebre*, serà transmès a les cel·les que en la següent actualització de rellotge rebran massa de neu movable.

L'event *Desplaçar* només tindrà efecte en cel·les en estat *Dinàmic*, quan aquestes reben una nova actualització del rellotge. Aquest event pot fer que la cel·la segueixi en aquest estat, per a després rebre un esdeveniment *Enviar*, o passi a ser d'estat *Estàtic*.

L' esdeveniment *Rebre* afectarà a totes les cel·les de la mateixa manera, sigui quin sigui el seu estat acabaran en estat *Dinàmic*.

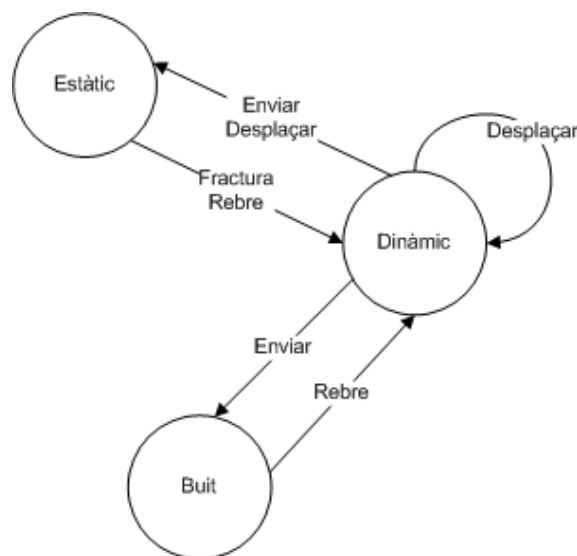


Figura 4.8: Diagrama d'estats

4.3.3 Bloc cel·la: Procés *Buit*

Una cel·la en estat *Buit* que rebi els esdeveniments *Fracturar*, *Desplaçar* o *Enviar* no realitzaran cap acció i romandrà en el mateix estat. En canvi, si rep l'event *Rebre*, canviarà el seu estat a *Dinàmic* i modificarà la seva informació SIG segons les dades calculades per la cel·la veïna que li ha enviat la massa de neu.

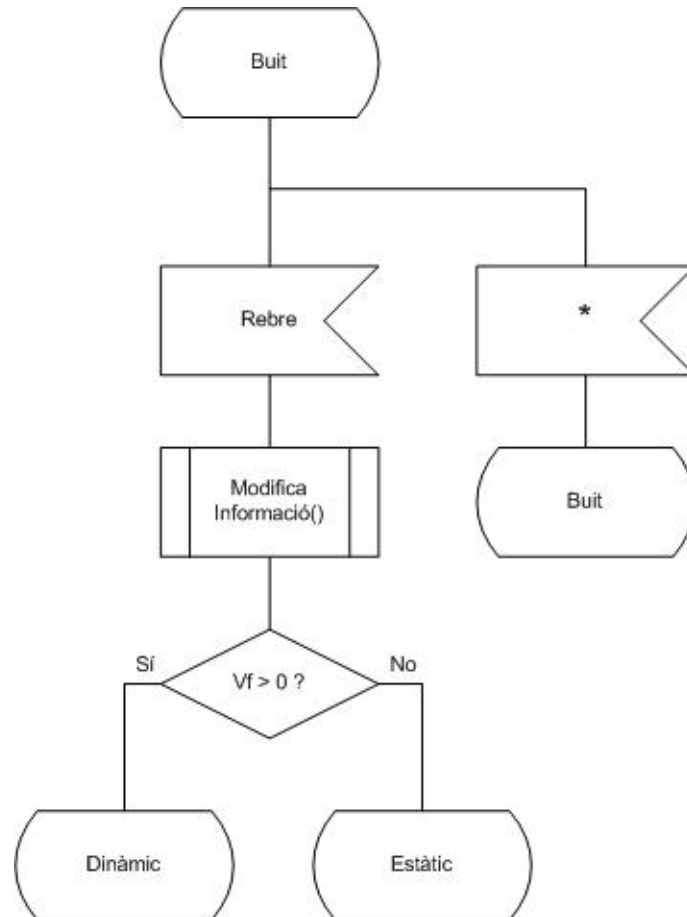


Figura 4.9: Diagrama Procés *Buit*

4.3.4 Bloc cel·la: Procés *Estàtic*

Una cel·la en estat *Estàtic* que rebí un event *Fracturar*, executa el procediment *Calcular Propagació*, en el qual s'aplica la regla d'evolució de la fase trencament. Si aquest procediment retorna una cel·la veïna a la que seguir propagant el trencament, la cel·la li envia un nou esdeveniment *Fracturar* a la cel·la veïna. Finalment, canvia el seu estat a *Dinàmic*.

En el cas que rebí l'event *Enviar* o *Desplaçar* no realitzarà cap acció i romandrà en el mateix estat. En canvi, si rep l'esdeveniment *Rebre* canviarà el seu estat a *Dinàmic* i modificarà la seva informació SIG segons les dades calculades per la cel·la veïna que li ha enviat la massa de neu.

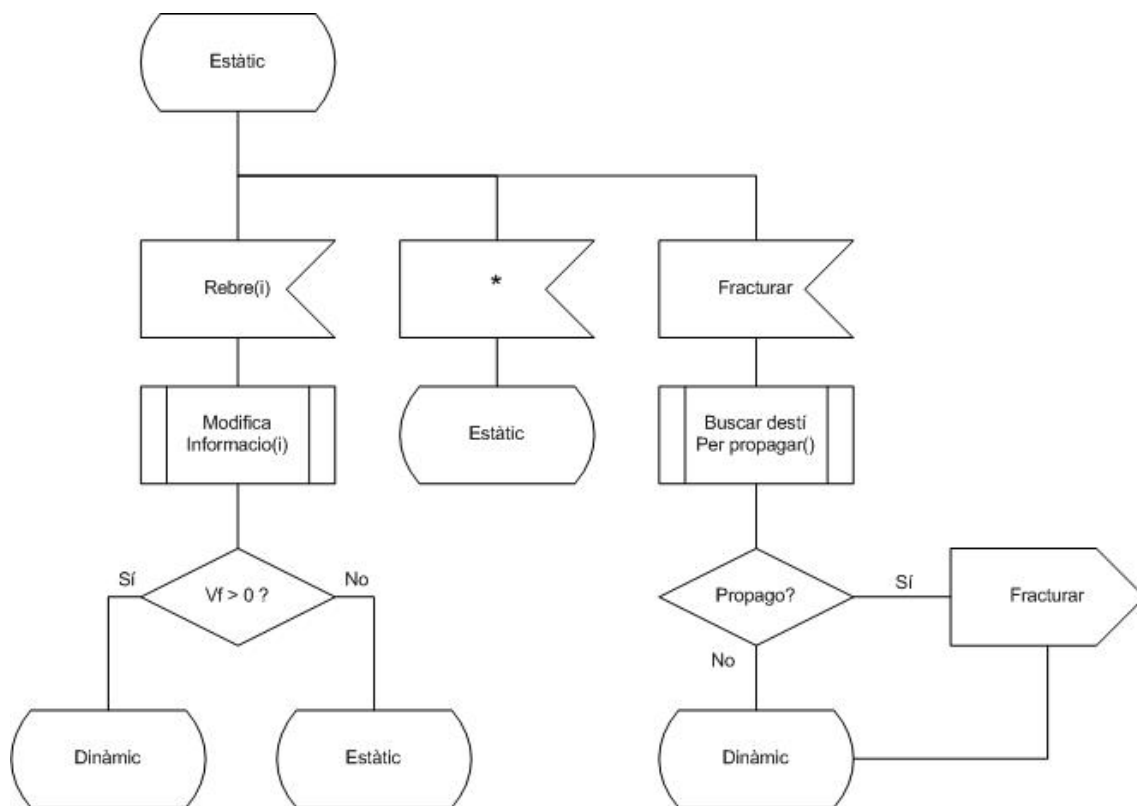


Figura 4.10: Diagrama Procés Estàtic

4.3.5 Bloc cel·la: Procés *Dinàmic*

Una cel·la en estat *Dinàmic* que rebi *Fracturar* no realitzarà cap acció i romandrà en el mateix estat. Si, en canvi, el que rep és un esdeveniment *Desplaçar*, la cel·la realitza el següents passos:

- ▷ 1. Executa el procediment *Calcular Destí*, el qual calcula si existeix una cel·la destí a la que propagar el lliscament.
 - ▷ 1a. Si el procediment retorna una cel·la destí .. continuar.
 - ▷ 1b. Si retorna nul .. canvia el seu estat a *Estàtic* i finalitza l'operació.
- ▷ 2. Executa el procediment *Calcular Força*, el qual calcula la força en que arribarà la massa de neu del lliscament a la cel·la destí.
 - ▷ 2a. Si el procediment retorna una força positiva .. continuar
 - ▷ 2b. Si no, canvia el seu estat a *Estàtic* i finalitza l'operació.
- ▷ 3. S'envia a si mateixa un event *Enviar* amb les dades que ha de modificar..
- ▷ 4. *Envia* un event *Rebre* a la cel·la destí amb les dades que aquesta ha de modificar.

En el cas que rebi un event *Enviar*, modifica la seva informació segons les dades calculades i el seu estat passa a ser *Buit*. En el cas de rebre un event *Rebre*, modifica la seva informació segons les dades calculades per la cel·la origen del desplaçament del qual n'és destí i roman en el mateix estat.

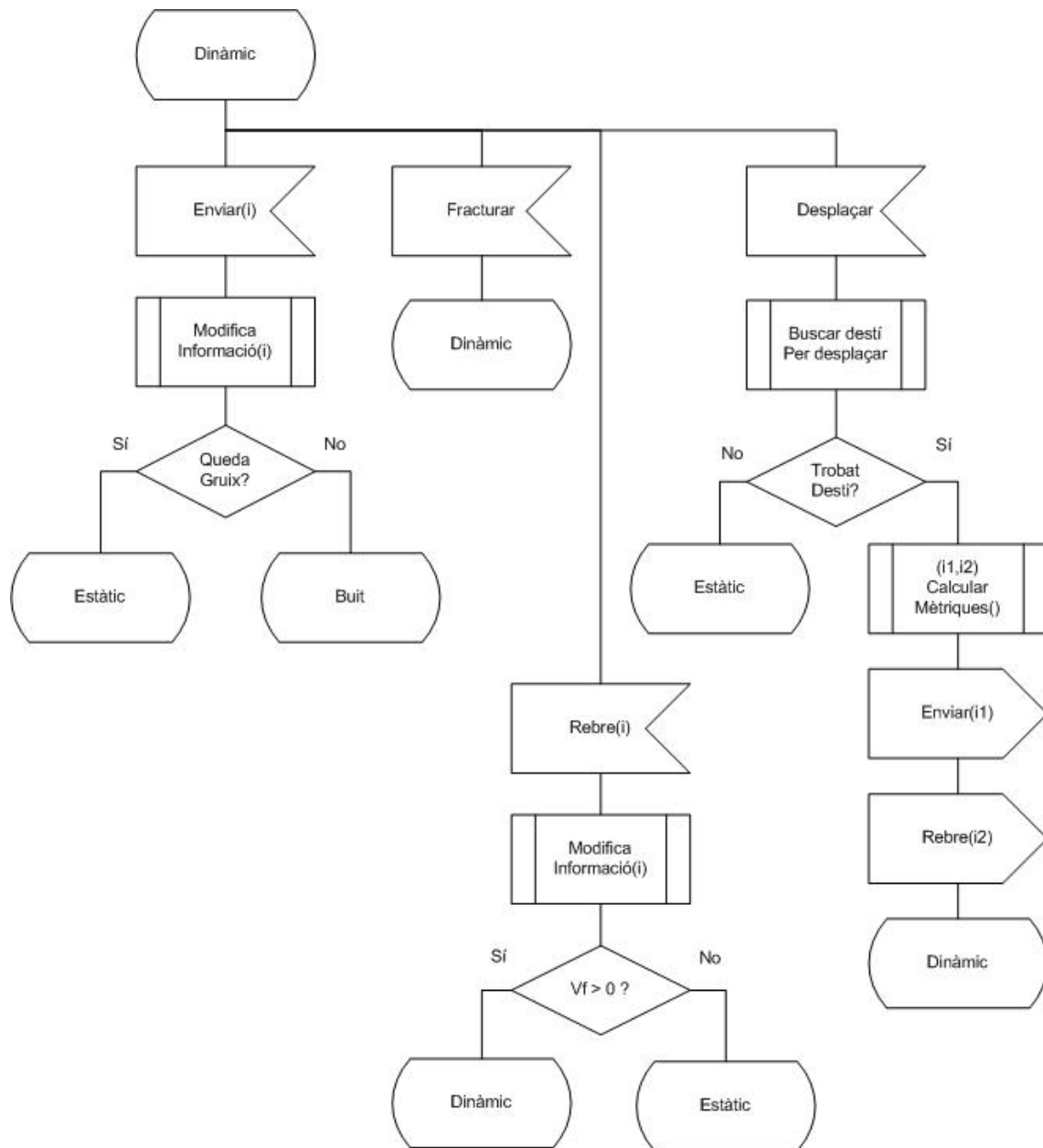


Figura 4.11: Diagrama Procés Dinàmic

4.3.6 Bloc cel·la: Procediments

Un procediment és un algorisme que s'encarrega de realitzar uns determinats càlculs o modificacions en les dades d'una cel·la, exceptuant l'estat. Detallem en aquesta secció tots aquests mòduls de càlcul que es troben per igual en cada cel·la.

Procediment *Modificar Informació(i)*

El procediment *Modificar Informació* tracta la informació SIG rebuda com a paràmetre (i) dels esdeveniments *Rebre* o *Enviar*. La seva tasca és la de modificar adequadament els valors de les capes partir de les dades enviades per una cel·la veïna o de si mateixa. Les dades que haurà de manipular són: gruix, força, velocitat i temps.

Procediment *Buscar destí per propagar*

Aquest procediment es dona quan una cel·la en estat *Estàtic* rep una senyal de *Fracturar*. A partir de la informació de les cel·les veïnes, determina si la fractura es propaga o no. Aquest procedimen és l'explicat a la secció 4.1.6.

Procediment *Buscar destí per desplaçar*

Aquest procediment de la fase de lliscament aplica l'algoritme 10 descrit a la secció 4.1.6. La capa d'alçada de cada cel·la del veïnatge és la que intervé en aquest procediment. La cel·la, doncs, haurà d'enviar per cada cel·la del veïnatge un missatge *Consulta Informació* per tal de conèixer els seus valors. Rebudes les respostes, el procediment s'encarrega d'agafar les dades del port i aplicar la primera part de la regla, que és la de la determinació de la cel·la receptora del possible moviment de massa de neu.

Procediment *Calcular Mètriques*

Aquest procediment, a partir del càlcul de la Força Total (F_T) determina la velocitat i l'instant de temps del moviment de la massa de neu. Aquests resultats obintuts són necessaris per tal d'enviar les senyals *Enviar* i *Rebre*.

4.3.7 Bloc cel·la: Decisions

Decisio $V_f > 0$?

Aquest punt de decisió es dona quan una cel·la rep neu d'una cel·la veïna, és a dir, quan li arriba el senyal *Rebre*. Quan una cel·la rep neu, pot ser que la massa s'aturi en aquesta mateixa cel·la. Per fer aquesta comprovació caldrà comprovar que la velocitat final (V_f) és positiva.

Decisio *Propago*?

Aquesta decisió analitza el resultat del procediment *Buscar destí per propagar*. Determina si s'ha trobat o no una cel·la a la que propagar la fractura.

Decisió *Queda Gruix*?

Quan una cel·la envia neu cap a una cel·la destí, pot ser que aquesta es quedi sense gruix de neu movable o bé hi resti una quantitat de massa. Aquesta és una hipòtesis descrita a la secció 4.2.2.

Decisió *Trobat destí*?

Aquesta decisió analitza el resultat del procediment *Buscar destí per desplaçar*. Determina si existeix o no una cel·la a la que desplaçar la neu movable.

Capítol 5

Validesa operacional del model

La metodologia emprada per la calibració del model és l'anomenada *Validació per Caixa Negra* descrita a la secció 2.5.4. Per aquest tipus de validació cal determinar el conjunt de variables experimentals i variables resposta. L'objectiu serà el de determinar el valor òptim de les variables experimentals.

5.1 Variables experimentals

La primera de les variables experimentals és el **coeficient de penalització** (K_p), descrit a la secció 4.2.2. Aquest paràmetre influeix directament sobre la força total (F_T) i per tant podem esperar que repercutirà amb molta importància la durada i la distància recorreguda de l'allau així com els paràmetres relacionats amb les velocitats i forces.

La segona variable experimental és el **coeficient d'inèrcia** (K_i) definit a la secció 4.2.2. Tot i que aquesta variable també influirà sobre la distància i la durada, on més afectarà aquest paràmetre és en el camí de l'allau. Cal recordar que el simulador, a part dels valors de les mètriques de l'allau també genera una representació en 3D del recorregut de l'allau. Per veure més clarament l'efecte d'aquesta variable es farà una comparació gràfica entre l'escenari real i l'escenari generat. Es pot veure l'efecte de la variable a la figura 5.1.

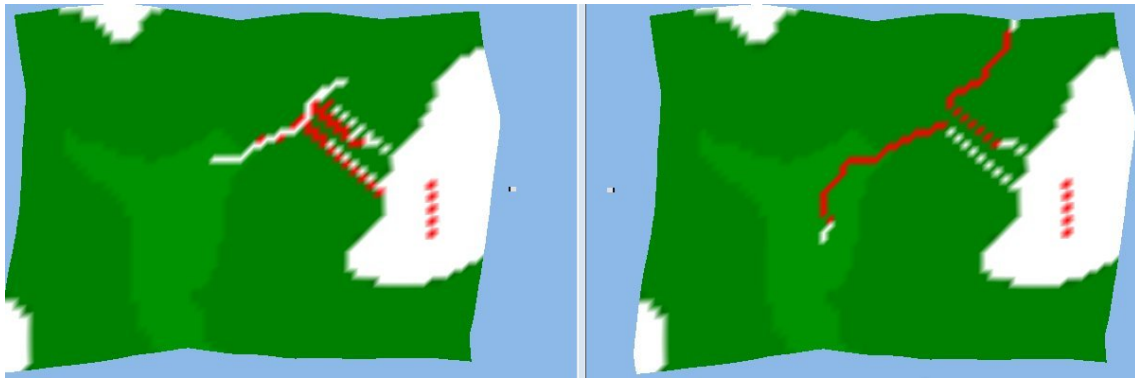


Figura 5.1: Efecte de la regla d'inèrcia

5.2 Variables resposta

Hi ha un nombre considerable de variables candidates a ser variables resposta, a l'annex C es poden veure totes els valors que el simulador calcula. Ara bé, s'han d'escollir aquelles que es puguin comparar amb resultats reals, i aquí, és on el nombre es limita.

Les dades utilitzades per la validació de les variables resposta provenen de dades experimentals. Els equips d'allaus de la Universitat de Barcelona (UB) juntament amb l'Institut Geològic de Catalunya (IGC) han col·laborat facilitant els informes resultants dels experiments realitzats en allaus reals. Aquesta informació serà clau per poder fer una correcta validació del model. Es pot veure un exemple d'informe a l'annex A.

Els informes contenen molta informació descriptiva de l'allau i una aproximació del que n'hauria estat el recorregut. Aquesta informació serà útil a l'hora de preparar l'escenari, especificar els gruixos de neu i indicar exactament el punt de trencament. Per altra banda, també es pot utilitzar aquesta informació descriptiva per comparar el recorregut final amb la representació 3D de l'allau.

Per contra, els informes són poc precisos a l'hora de quantificar l'allau en valors numèrics. Segons l'informe, s'hi especifica un tipus d'informació o altra, tot i això, en gairebé tots els informes es pot extreure el valor de la ***distància recorreguda*** i el ***desnivell***. Així, juntament amb la representació en 3D del recorregut de l'allau, aquestes seran les variables resposta que s'utilitzaran per la calibració del simulador.

5.3 Disseny dels experiments

Per la calibració del model s'utilitzaran informes d'allaus reals proporcionats per l'IGC. El primer pas serà el de seleccionar els informes de les allaus que continguin més informació útil per la comparació i aquells que presentin més similituds al tipus d'allau escollit. Segons la nomenclatura utilitzada en els informes, el tipus d'allau que s'ajusta més al modelat és *l'allau de placa de neu seca amb un dipòsit en blocs*.

Per a cada informe d'allau escollit, es construirà un o més escenaris que puguin representar l'escenari real. Cada *escenari* presentarà certes diferències en la configuració inicial: gruix de neu movable, el punt de trencament o bé la cota de neu. La representació en diferents escenaris ajudarà a determinar l'efecte que pot causar un canvi en la configuració inicial.

Per a cada escenari plantejat, es dissenyaran un o més *experiments*, segons els resultats obtinguts. Un cop es tinguin els resultats per a cada escenari, es seleccionarà el valor òptim per cada *variable experimental*. El valor òptim serà aquell que fa que les variables resposta s'aproximin més als valors reals. Un cop acabats tots els experiments, es realitzarà un anàlisi dels resultats obtinguts en cada escenari i experiment. Aquest serà el procediment més important i el que quantificarà la validesa del model.

5.3.1 Adaptació del software

Per la realització dels experiments s'ha adaptat el software del simulador. L'objectiu de l'adaptació era el de poder llançar una bateria de simulacions cadascuna amb valors diferents de les variables experimentals i a la vegada, recollir el resultat de les simulacions en un format útil per poder-ne fer un anàlisi. S'anomenarà un *joc de paràmetres* a una parella de valors de *coeficient de penalització i d'inèrcia*.

Així, donat un *conjunt d'escenaris* i un *conjunt de jocs de paràmetres*, es pretén realitzar la simulació de tots els casos resultants de la intersecció dels dos conjunts. Per definir aquests dos conjunts s'ha utilitzat un arxiu en format XML. La descripció d'aquest arxiu i de com realitzar múltiples simulacions està detallat a l'annex E

5.4 Allau NUR029199801

5.4.1 Dades experimentals

Aquesta allau la situem a la zona de Mulleres prop de l'estació d'esquí de la Vall de Núria. L'allau va estar registrada per l'IGC l'hivern del 1998 a la vessant nord-oest del pic de l'Àliga.

Aquesta és la informació proporcionada per l'IGC:

NUR029199801	
Amplada zona sortida	50 m
Gruix cicatriu	? m
Cota superior	2380 m
Cota inferior	2030 m
Distància recorreguda	635 m
Desnivell	350 m

Taula 5.1: Dades allau NUR029199801

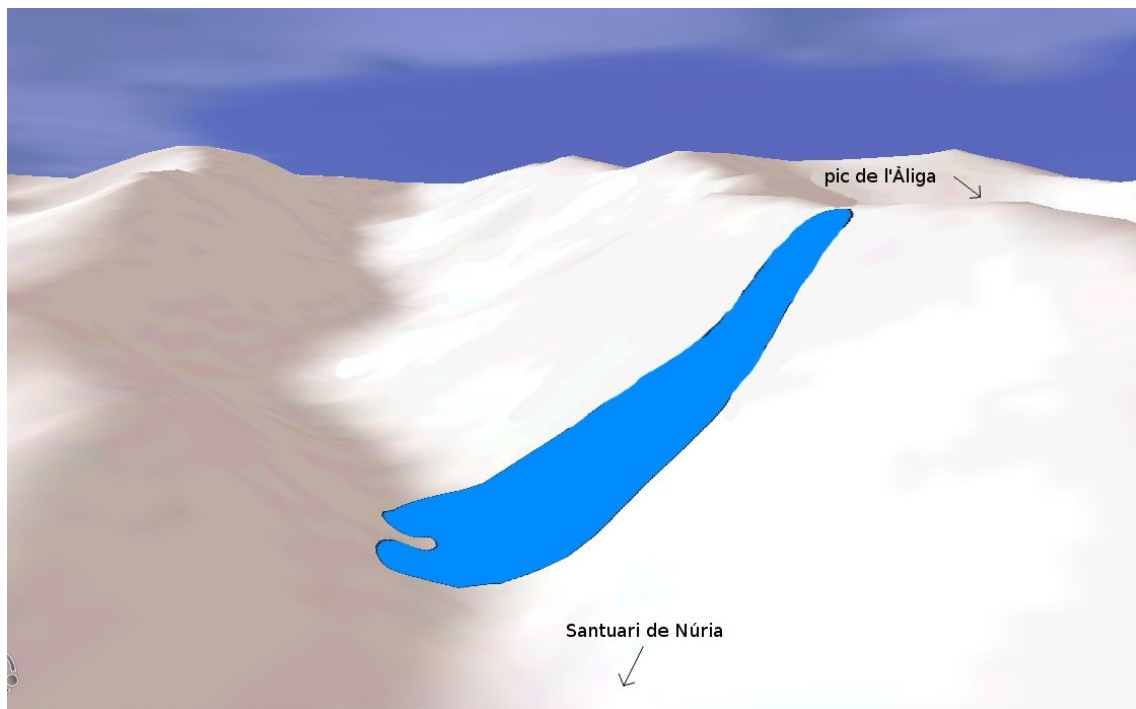


Figura 5.2: Informació sobre l'allau NUR029199801

5.4.2 Escenari: Núria1

Condicions de l'escenari Núria1

Cota neu placa:	2180 m
Amplada zona sortida	60 m (dues cel·les)
Coordenades trencament	UTM (431425.375000, 4694534.500000) (431425.375000, 4694504.000000)
Gruix cicatriu	0.5 m
Terreny	Neu pols cotes inferiors a 2180 m Neu dura cotes superiors a 2180 m

Taula 5.2: Condicions escenari Núria1

Experiment1 (Núria1)

Aquest primer experiment s'ha dissenyat per concebre una idea general dels paràmetres. S'ha escollit un marge gran pels dos valors i s'han fet simulacions de totes les combinacions possibles. S'han escollit 3 valors pel coeficient d'inèrcia (*coef.i*) i 10 pel coeficient de penalització (*coef.p*), constituint així un total de 30 simulacions.

$$coef.i = \{0.30, 0.60, 0.90\}$$

$$coef.p = \{0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50\}$$

coef.p	dist (m), desn (m)	dist (m), desn (m)	dist (m), desn (m)
	coef.i = 0.30	coef.i = 0.60	coef.i = 0.90
0.050	800.500, 392.000	713.092, 383.000	720.000, 352.800
0.100	771.298, 389.100	692.604, 374.600	553.173, 321.700
0.150	713.092, 383.000	646.220, 364.200	617.738, 347.100
0.200	674.166, 367.800	630.714, 361.100	617.738, 347.100
0.250	646.220, 364.200	630.714, 361.100	469.574, 279.200
0.300	468.615, 287.700	591.693, 347.500	591.693, 347.500
0.350	468.615, 287.700	558.032, 331.800	591.693, 347.500
0.400	426.380, 263.700	432.666, 267.000	432.666, 267.000
0.450	384.187, 247.200	384.187, 247.200	408.044, 257.900
0.500	342.053, 231.600	342.053, 231.600	342.053, 231.600

Taula 5.3: Resultats de l'Experiment1 de Núria1

S'aconsegueixen resultats molt aproximats en una varietat molt àmplia de paràmetres. Si observem el perfil del terreny on es desencadena l'allau, veurem que els resultats no són del tot significatius. L'allau mor a una vall i això fa que fàcilment, independentment dels paràmetres, l'allau s'aproximi al patró de l'allau real. Tot i això, aquest experiment pot ser interessant per veure la forma del camí que recorre l'allau fins a arribar a la vall.

A la figura 5.3 es comparen dos recorreguts simulats amb el l'allau real com a patró.



Figura 5.3: Representacions gràfiques de l'Experiment1 a l'escenari Núria1)

5.5 Allau NTR184200301

5.5.1 Dades experimentals

Aquesta es tracta d'una allau de grans dimensions, va tenir lloc a la zona de Noguera de Tor.

Aquesta és la informació proporcionada per l'IGC:

NUR029199801	
Amplada zona sortida	500 m ?
Gruix cicatriu	1 m
Cota superior	2960 m
Cota inferior	2210 m
Distància recorreguda	1350 m
Desnivell	750 m

Taula 5.4: Dades allau NTR184200301

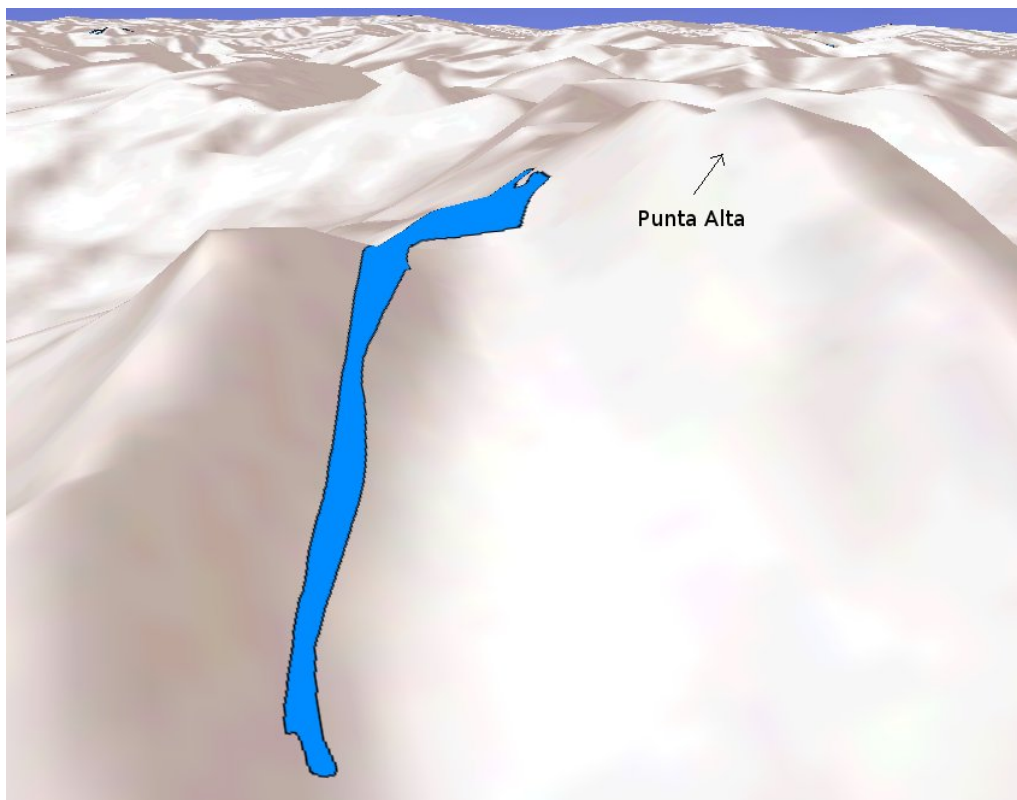


Figura 5.4: Informació sobre l'allau NTR184200301

5.5.2 Escenari: NogueraTor1

Condicions de l'escenari NogueraTor1

Cota neu placa:	2700 m
Amplada zona sortida	180 m (sis cel·les)
Coordenades trencament	UTM (326238.906250, 4717457.000000) (326238.906250, 4717427.000000) (326238.906250, 4717397.000000) (326178.468750, 4717457.000000) (326178.468750, 4717427.000000) (326178.468750, 4717397.000000)
Gruix cicatriu	1 m
Terreny	Neu pols cotes inferiors a 2700 m Neu dura cotes superiors a 2700 m

Taula 5.5: Condicions escenari NogueraTor1

Experiment1 (NogueraTor1)

Aquest experiment s'han probat els mateixos paràmetres que a l'Experiment1 de Núria1:

$$coef.i = \{0.30, 0.60, 0.90\}$$

$$coef.p = \{0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50\}$$

coef.p	dist (m), desn (m)	dist (m), desn (m)	dist (m), desn (m)
	coef.i = 0.30	coef.i = 0.60	coef.i = 0.90
0.05	990.454, 487.200	2100.214, 1082.400	1103.902, 460.700
0.10	732.393, 391.100	976.729, 430.600	976.729, 430.600
0.15	684.105, 363.500	708.025, 380.900	722.496, 343.800
0.20	660.681, 345.300	732.393, 391.100	680.147, 334.700
0.25	576.281, 315.000	509.117, 295.100	509.117, 295.100
0.30	553.173, 308.700	553.173, 308.700	595.483, 314.400
0.35	553.173, 308.700	553.173, 308.700	553.173, 308.700
0.40	466.690, 287.800	509.117, 295.100	509.117, 295.100
0.45	361.248, 239.500	361.248, 239.500	361.248, 239.500
0.50	318.904, 207.800	318.904, 207.800	318.904, 207.800

Taula 5.6: Resultats de l'Experiment1 de NogueraTor1

Experiment2 (NogueraTor1)

En el segon experiment s'ha volgut acurar més la calibració. Segons els resultats de l'Experiment1, s'aconsegueixen bons resultats quan $coef.p < 0.10$. Així doncs, els conjunts de valors a provar seran:

$$coef.i = \{0.30, 0.45, 0.60, 0.75\}$$

$$coef.p = \{0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.10\}$$

coef.p	dist (m)	dist (m)	dist (m)	dist (m)	dist (m)
	coef.i = 0.30	coef.i = 0.45	coef.i = 0.60	coef.i = 0.75	coef.i = 0.90
0.01	2100.214	2100.214	2100.214	2146.835	1248.880
0.02	2100.214	2172.050	2100.214	2146.835	1146.298
0.03	2100.214	2172.050	2100.214	2172.050	2172.050
0.04	2100.214	2100.214	1236.932	1236.932	1236.932
0.05	990.454	2100.214	2100.214	1209.339	1103.902
0.06	957.183	2100.214	2146.835	1154.513	1209.339
0.07	957.183	2100.214	2100.214	1061.508	1061.508
0.08	823.772	2172.050	2100.214	1140.395	1167.305
0.09	798.812	2172.050	1019.117	1019.117	1019.117
0.10	732.393	2072.390	976.729	976.729	976.729

Taula 5.7: Variable experimental *Distància*

coef.p	desn (m)	desn (m)	desn (m)	desn (m)	desn (m)
	coef.i = 0.30	coef.i = 0.45	coef.i = 0.60	coef.i = 0.75	coef.i = 0.90
0.01	1082.400	1082.400	1082.400	1046.900	643.600
0.02	1082.400	1056.700	1082.400	1046.900	468.300
0.03	1082.400	1056.700	1082.400	1056.700	1056.700
0.04	1082.400	1082.400	632.700	632.700	632.700
0.05	487.200	1082.400	1082.400	622.400	460.700
0.06	488.900	1082.400	1046.900	595.200	622.400
0.07	488.900	1082.400	1082.400	453.200	453.200
0.08	432.700	1056.700	1082.400	589.400	605.500
0.09	421.700	1056.700	444.500	444.500	444.500
0.10	391.100	1082.400	430.600	430.600	430.600

Taula 5.8: Variable experimental *Desnivell*

En els resultats del segon experiment es pot observar un fet molt interessant. A grans trets, es poden classificar els resultats en dos grups: considerant la variable resposta *distància*, valors que ronden els 1000 m i valors que superen els 2000 m. La diferència és molt gran per una variació de paràmetres tan petita.

Evidentment, aquest efecte és causat per una singularitat en el terreny. Concretament, el terreny té un monticle a la meitat de la vessant que, uns paràmetres aconseguirien superar i d'altres no. Aquest fet és importantíssim ja que ajudarà a validar els resultats obtinguts. Si analitzem la cartografia de l'allau, s'observa que l'allau real no aconsegueix superar-lo. Ara bé, Els resultats de les variables resposta (vora els 1000 m) varien significativament amb les dades reals (vora 1300 m).

Una comparativa gràfica pot ajudar a entendre aquesta variació:

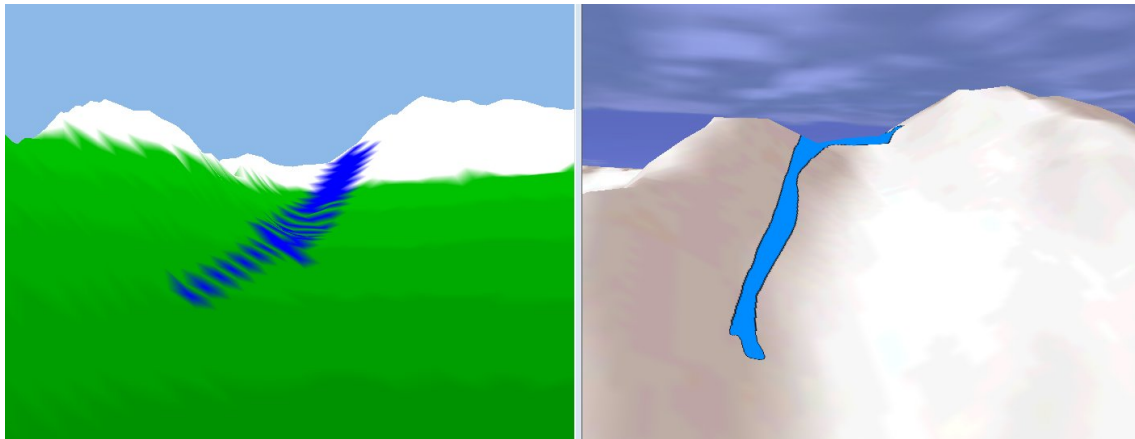


Figura 5.5: Comparativa gràfica del l'allau NTR184200301, paràmetres $coef.i = 0.60$ i $coef.p = 0.10$

La principal diferència entre els dos recorreguts és a l'inici, durant la propagació de l'escletxa. El model que s'ha desenvolupat propaga l'escletxa en direcció al pendent de la vessant. En canvi, segons la informació gràfica de l'allau sembla ser que l'escletxa es propaga horitzontalment fent que varïi significativament el recorregut de l'allau respecte el simulat. Tot i aquesta diferència a l'inici, el dipòsit de l'allau sembla coincidir amb el recorregut de l'allau real.

5.6 Allau RaspesRoies96

5.6.1 Dades experimentals

Aquesta es tracta de l'allau detallat a l'annex A. Va tenir lloc prop de l'estació d'esquí de Boí Taüll l'11 de Gener de 1996.

Aquest és un resum la informació més important proporcionada per l'IGC, la informació completa de l'allau es troba a l'annex A:

Raspes Roies	
Amplada zona sortida	segons el mapa: dues àrees d'uns 100 m cadascuna
Gruix cicatriu	0.5 m
Cota superior	2710 m
Cota inferior	2210 m
Distància recorreguda	840 m
Desnivell	500 m

Taula 5.9: Dades allau RaspesRoies96

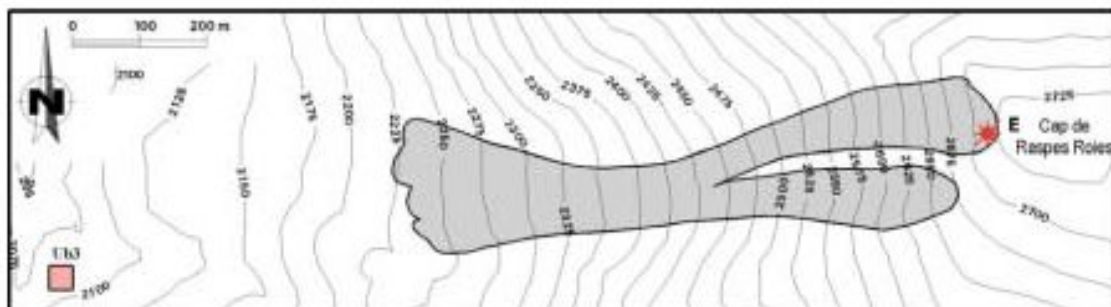


Figura 5.6: Informació gràfica de l'allau de Raspes Roies

5.6.2 Escenari: RaspesRoies1

Condicions de l'escenari RaspesRoies1

Cota neu placa:	2500 m
Amplada zona sortida	140 m (cinc cel·les)
Coordenades trencament	UTM (326387.375000, 4705156.000000) (326387.375000, 4705125.500000) (326387.375000, 4705095.000000) (326387.375000, 4705034.000000) (326387.375000, 4705003.500000)
Gruix cicatriu	0,5 m
Terreny	Neu pols cotes inferiors a 2500 m Neu dura cotes superiors a 2500 m

Taula 5.10: Condicions escenari RaspesRoies1

Experiment1 (RaspesRoies1)

En aquest experiment s'han probat els mateixos paràmetres que a l'Experiment1 de Núria1:

$$coef.i = \{0.30, 0.60, 0.90\}$$

$$coef.p = \{0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50\}$$

coef.p	dist (m), desn (m)	dist (m), desn (m)	dist (m), desn (m)
	coef.i = 0.30	coef.i = 0.60	coef.i = 0.90
0.05	823.772, 414.900	870.517, 446.200	870.517, 446.200
0.10	750.000, 385.800	720.625, 388.000	720.625, 388.000
0.15	692.604, 370.100	597.746, 332.100	606.712, 338.200
0.20	569.210, 319.500	523.927, 287.000	523.927, 287.000
0.25	429.535, 248.300	379.473, 231.500	456.946, 262.500
0.30	308.869, 180.200	268.328, 163.400	268.328, 163.400
0.35	268.328, 163.400	258.070, 142.400	258.070, 142.400
0.40	241.868, 145.000	216.333, 126.100	216.333, 126.100
0.45	216.333, 126.100	216.333, 126.100	216.333, 126.100
0.50	174.929, 105.900	174.929, 105.900	174.929, 105.900

Taula 5.11: Resultats de l'Experiment1 de RaspesRoies1

Experiment2 (RaspesRoies1)

En el segon experiment, igual que en el segon experiment de NogueraTor1, s'ha volgut acurar més la calibració. Segons els resultats de l'Experiment1, s'aconsegueixen bons resultats quan $coef.p < 0.10$. Així doncs, els conjunts de valors a provar seran:

$$coef.i = \{0.30, 0.45, 0.60, 0.75\}$$

$$coef.p = \{0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.10\}$$

A diferència de l'Experiment2 de NogueraTor, s'ha descartat el valor de $coef.i = 0.900$ ja que no donava cap diferència amb els resultats de $coef.i = 0.750$.

coef.p	dist (m)	dist (m)	dist (m)	dist (m)
	coef.i = 0.30	coef.i = 0.45	coef.i = 0.60	coef.i = 0.75
0.01	912.414	960.000	960.000	960.469
0.02	901.998	930.484	930.484	930.484
0.03	874.643	930.000	930.000	930.000
0.04	848.528	900.500	900.500	900.500
0.05	823.772	870.517	870.517	870.517
0.06	800.500	771.298	810.555	810.555
0.07	800.500	742.159	780.577	780.577
0.08	750.000	742.159	750.600	750.600
0.09	778.845	713.092	750.600	750.600
0.10	750.000	721.249	720.625	720.625

Taula 5.12: Variable experimental *Distància*

coef.p	desn (m)	desn (m)	desn (m)	desn (m)
	coef.i = 0.30	coef.i = 0.45	coef.i = 0.60	coef.i = 0.75
0.01	402.700	468.800	468.800	467.500
0.02	452.500	461.800	461.800	461.800
0.03	439.300	463.200	463.200	463.200
0.04	426.500	455.200	455.200	455.200
0.05	414.900	446.200	446.200	446.200
0.06	402.500	392.900	418.700	418.700
0.07	402.500	384.500	406.600	406.600
0.08	385.800	384.500	396.200	396.200
0.09	391.800	375.600	396.200	396.200
0.10	385.800	378.100	388.000	388.000

Taula 5.13: Variable experimental *Desnivell*

S'han seleccionat els paràmetres $coef.i = 0.60$ i $coef.p = 0.10$ per a la comparació gràfica. Aquest paràmetres donen uns resultats força bons a les variables resposta:

	distància	desnivell
valors reals	840 m	500 m
valors simulats	720 m	388 m

Taula 5.14: Comparativa de les variables resposta

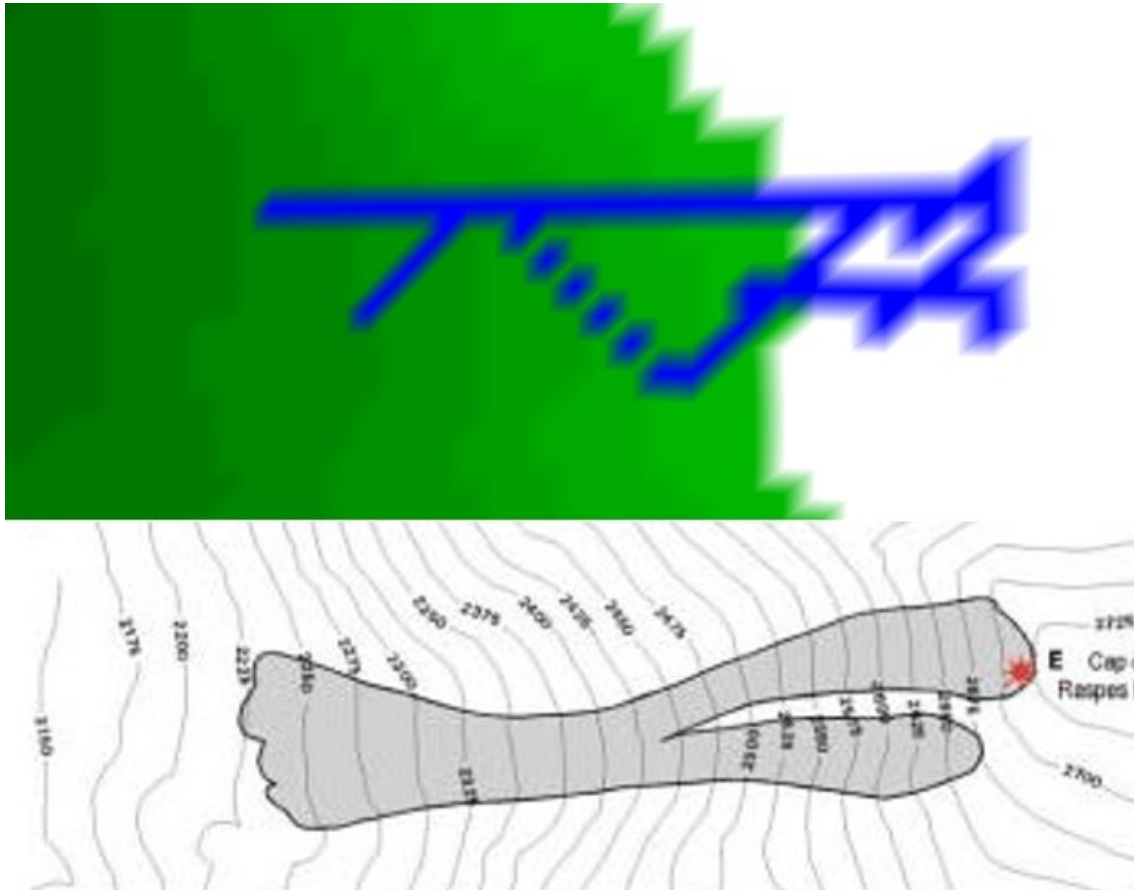


Figura 5.7: Comparativa del camí amb els paràmetres $coef.i = 0.60$ i $coef.p = 0.10$

5.6.3 Escenari: RaspesRoies2

Condicions de l'escenari RaspesRoies1

Aquest segon escenari té com a objectiu veure l'efecte de la cota de neu de placa. La diferència amb l'escenari RaspesRoies1 és únicament la cota de neu de placa, aquesta augmenta 50 m, passa de 2500 m a 2450 m.

Cota neu placa:	2450 m
Amplada zona sortida	140 m (cinc cel·les)
Coordenades trencament	UTM (326387.375000, 4705156.000000) (326387.375000, 4705125.500000) (326387.375000, 4705095.000000) (326387.375000, 4705034.000000) (326387.375000, 4705003.500000)
Gruix cicatriu	1 m
Terreny	Neu pols cotes inferiors a 2450 m Neu dura cotes superiors a 2450 m

Taula 5.15: Condicions escenari RaspesRoies2

Experiment1 (RaspesRoies2)

En aquest experiment es provaran menys paràmetres, la única finalitat de l'experiment és veure l'efecte de la cota de neu de placa.

$$coef.i = \{0.30, 0.60\}$$

$$coef.p = \{0.05, 0.10, 0.15\}$$

L'efecte de la cota en els resultats sembla ser notable. En el cas d'aquesta allau, una cota inferior de neu, provoca un augment en les variables resposta.

paràmetres	cota 2450	cota 2500 m
coef.i, coef.p	dist (m), desn (m)	dist (m), desn (m)
0.30, 0.05	874.643, 439.300	823.772, 414.900
0.30, 0.10	778.845, 391.800	750.000, 385.800
0.30, 0.15	721.249, 378.100	692.604, 370.100
0.60, 0.05	930.484, 461.800	870.517, 446.200
0.60, 0.10	780.577, 406.600	720.625, 388.000
0.60, 0.15	660.681, 363.400	597.746, 332.100

Taula 5.16: Comparativa canviant la cota de neu de placa

Per cabar amb l'experiment es compararà gràficament les simulacions amb paràmetres $coef.i = 0.60$ i $coef.p = 0.10$. La primera imatge correspon a la simulació de l'escenari RaspesRoies1 (cota 2500m) i la segona imatge a l'escenari RaspesRoies1 (2450m).

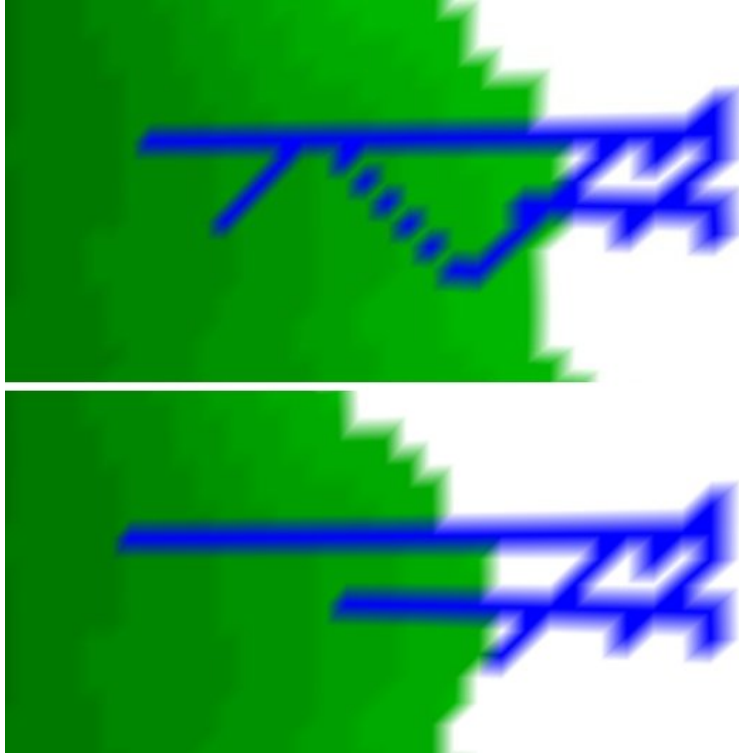


Figura 5.8: Comparativa del camí amb els paràmetres $coef.i = 0.60$ i $coef.p = 0.10$ amb dues cotes diferents

5.7 Allau SMR170200604

5.7.1 Dades experimentals

L'allau es situa a la zona de Sant Martí. Prop de l'estació d'esquí de Boí Taüll, al sud de puig Falcó. Aquesta és la informació proporcionada per l'IGC:

SMR170200604	
Amplada zona sortida	115 m ?
Gruix cicatriu	0.5 m
Cota superior	2495 m
Cota inferior	2264 m
Distància recorreguda	467 m
Desnivell	233 m

Taula 5.17: Dades allau SMR170200604

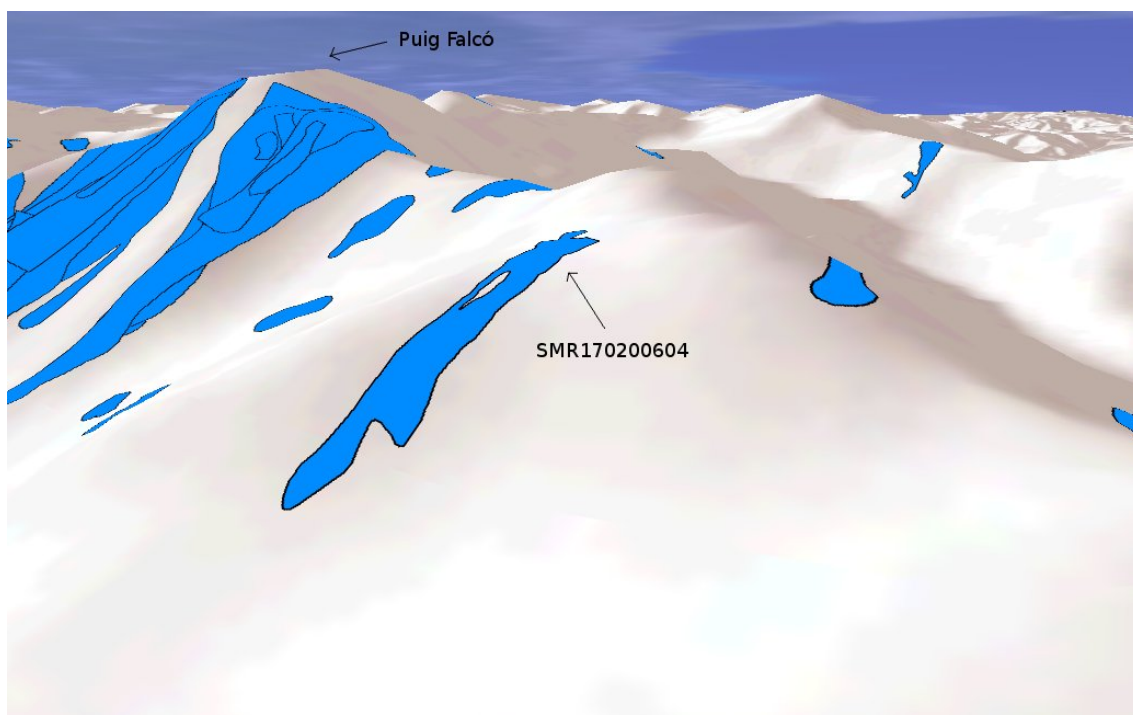


Figura 5.9: Informació sobre l'allau SMR170200604

5.7.2 Escenari: SantMartí1

Condicions de l'escenari SantMartí1

Cota neu placa:	2400 m
Amplada zona sortida	90 m (dues cel·les)
Coordenades trencament	UTM (326003.031250, 4704019.000000) (326003.031250, 4703988.000000) (326003.031250, 4703957.500000)
Gruix cicatriu	0.5 m
Terreny	Neu pols cotes inferiors a 2400 m Neu dura cotes superiors a 2400 m

Taula 5.18: Condicions escenari SantMartí1

Experiment1 (SantMartí1)

Ara que s'han obtingut bons resultats en els experiments anteriors, es pot preparar un experiment més adequat: s'eliminaran els valors de les variables experimentals que no tenen interès. S'han escollit 4 valors pel coeficient d'inèrcia (*coef.i*) i 10 pel coeficient de penalització (*coef.p*), constituint així un total de 40 simulacions.

$$coef.i = \{0.30, 0.45, 0.60, 0.75\}$$

$$coef.p = \{0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.20\}$$

coef.p	dist (m)	dist (m)	dist (m)	dist (m)
	coef.i = 0.30	coef.i = 0.45	coef.i = 0.60	coef.i = 0.75
0.020	531.601	531.601	870.000	870.000
0.040	488.365	531.601	827.587	827.587
0.060	453.982	502.892	827.587	827.587
0.080	494.773	502.892	502.892	785.175
0.100	465.725	474.342	474.342	700.357
0.120	465.725	474.342	474.342	657.951
0.140	436.807	445.982	445.982	400.250
0.160	436.807	445.982	445.982	391.152
0.180	408.044	417.852	417.852	417.852
0.200	408.044	360.000	390.000	390.000

Taula 5.19: Resultats de la variable *distància* de l'Experiment1 de SantMartí1

coef.p	desn (m)	desn (m)	desn (m)	desn (m)
	coef.i = 0.30	coef.i = 0.45	coef.i = 0.60	coef.i = 0.75
0.020	263.300	263.300	326.100	326.100
0.040	254.000	263.300	323.600	323.600
0.060	247.300	256.800	323.600	323.600
0.080	255.300	256.800	256.800	316.300
0.100	248.100	249.100	249.100	288.700
0.120	248.100	249.100	249.100	274.400
0.140	240.200	241.300	241.300	231.200
0.160	240.200	241.300	241.300	229.900
0.180	232.000	232.700	232.700	232.700
0.200	232.000	218.300	220.700	220.700

Taula 5.20: Resultats de la variable *desnivell* de l'Experiment1 de SantMartí

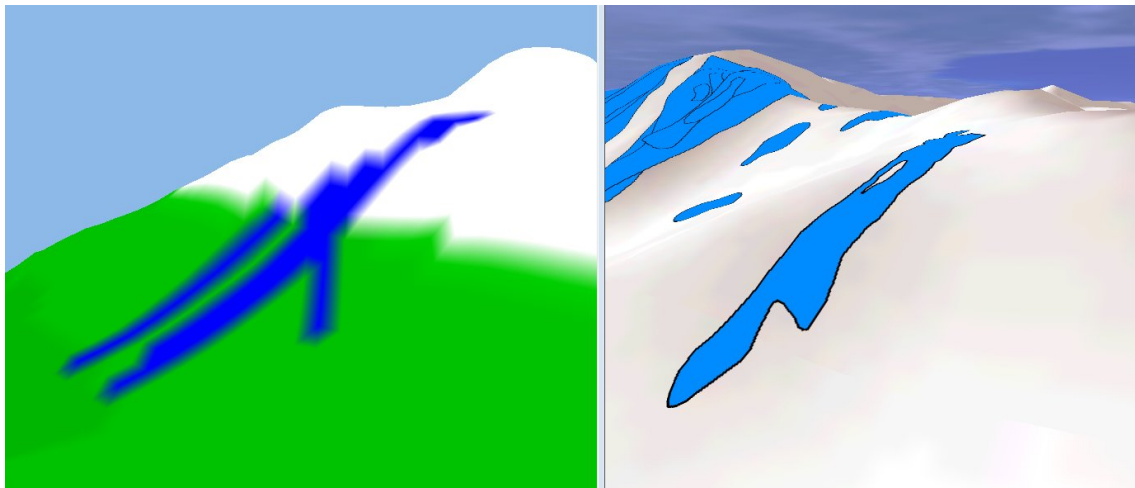


Figura 5.10: comparació gràfica de l'allau SMR170200604 amb els paràmetres $coef.i = 0.60$ i $coef.p = 0.10$

En aquest experiment els resultats gràfics han donat molt bons resultats. Si s'observa la cartografia de l'allau original, es pot veure que no només coincideix la distància, el desnivell i la direcció sinó que a més a més es mostren coincidències en dos trets característics de l'allau. El primer dels trets és el buit de neu que resulta a la part esquerra de l'allau (mirant l'allau de baix a dalt). I el segon tret característic és el dipòsit que l'allau forma a la part dreta just a la meitat de la vessant de la muntanya.

5.8 Allau RUD006200408

5.8.1 Dades experimentals

Aquesta és la informació proporcionada per l'IGC:

RUD006200408	
Amplada zona sortida	83 m
Gruix cicatriu	1.8 m
Cota superior	1920 m
Cota inferior	1580 m
Distància recorreguda	562 m
Desnivell	360 m

Taula 5.21: Dades allau RUD006200408

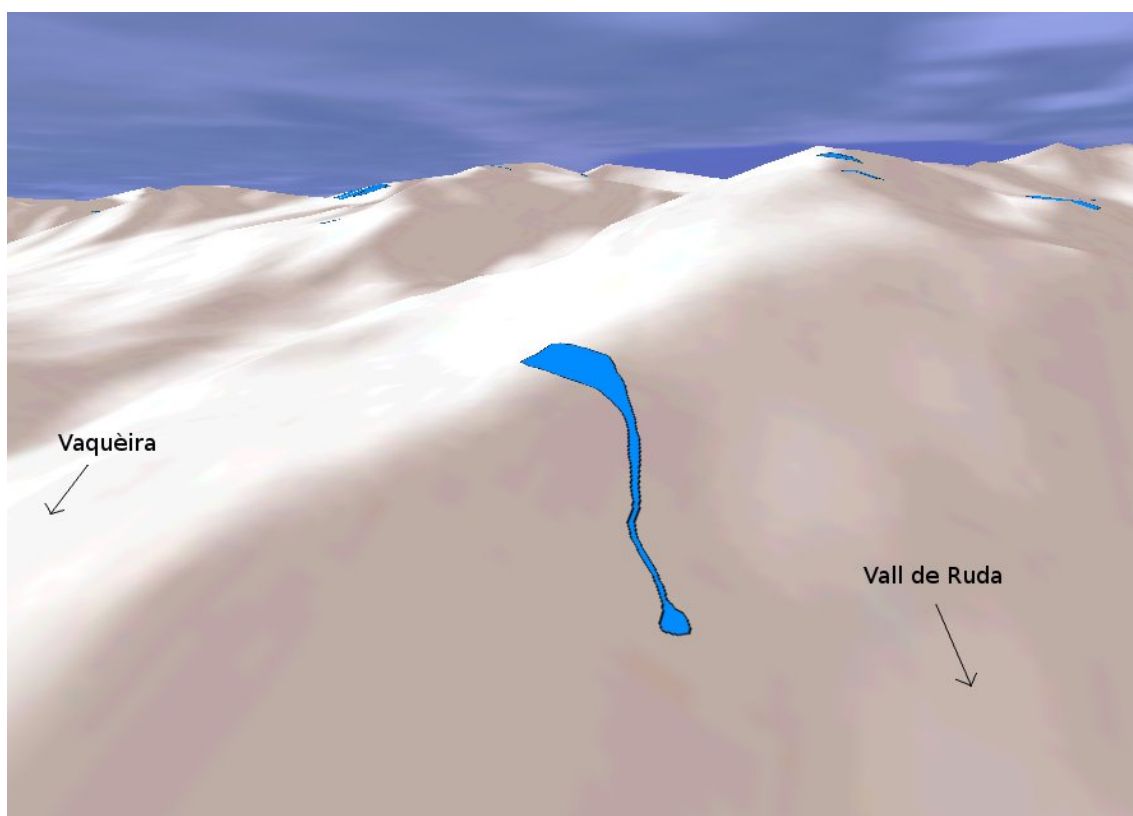


Figura 5.11: Informació sobre l'allau RUD006200408

5.8.2 Escenari: Ruda1

Condicions de l'escenari Ruda1

Cota neu placa:	1800 m
Amplada zona sortida	12 m (4 cel·les)
Coordenades trencament	UTM (332152.500000, 4729137.500000) (332152.500000, 4729106.500000) (332152.500000, 4729075.500000) (332152.500000, 4729045.000000)
Gruix cicatriu	1.8 m
Terreny	Neu pols cotes inferiors a 1800 m Neu dura cotes superiors a 1800 m

Taula 5.22: Condicions escenari Ruda1

Experiment1 (Ruda1)

En aquest experiment s'han repetit els paràmetres utilitzats a l'Experiment1 de l'allau de Sant Martí.

$$coef.i = \{0.30, 0.45, 0.60, 0.75\}$$

$$coef.p = \{0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.20\}$$

coef.p	dist (m)	dist (m)	dist (m)	dist (m)
	coef.i = 0.30	coef.i = 0.45	coef.i = 0.60	coef.i = 0.75
0.020	785.175	785.175	785.175	785.175
0.040	807.217	807.217	807.217	807.217
0.060	700.357	700.357	700.357	700.357
0.080	785.175	785.175	785.175	785.175
0.100	530.754	530.754	530.754	530.754
0.120	488.365	488.365	488.365	488.365
0.140	445.982	445.982	445.982	445.982
0.160	445.982	445.982	445.982	445.982
0.180	403.609	403.609	403.609	403.609
0.200	806.102	806.102	806.102	806.102

Taula 5.23: Resultats de la variable *distància* de l'Experiment1 de Ruda1

coef.p	desn (m)	desn (m)	desn (m)	desn (m)
	coef.i = 0.30	coef.i = 0.45	coef.i = 0.60	coef.i = 0.75
0.020	422.000	422.000	422.000	422.000
0.040	421.700	421.700	421.700	421.700
0.060	389.100	389.100	389.100	389.100
0.080	422.000	422.000	422.000	422.000
0.100	310.000	310.000	310.000	310.000
0.120	275.200	275.200	275.200	275.200
0.140	243.400	243.400	243.400	243.400
0.160	243.400	243.400	243.400	243.400
0.180	210.800	210.800	210.800	210.800
0.200	421.900	421.900	421.900	421.900

Taula 5.24: Resultats de la variable *desnivell* de l'Experiment1 de Ruda1

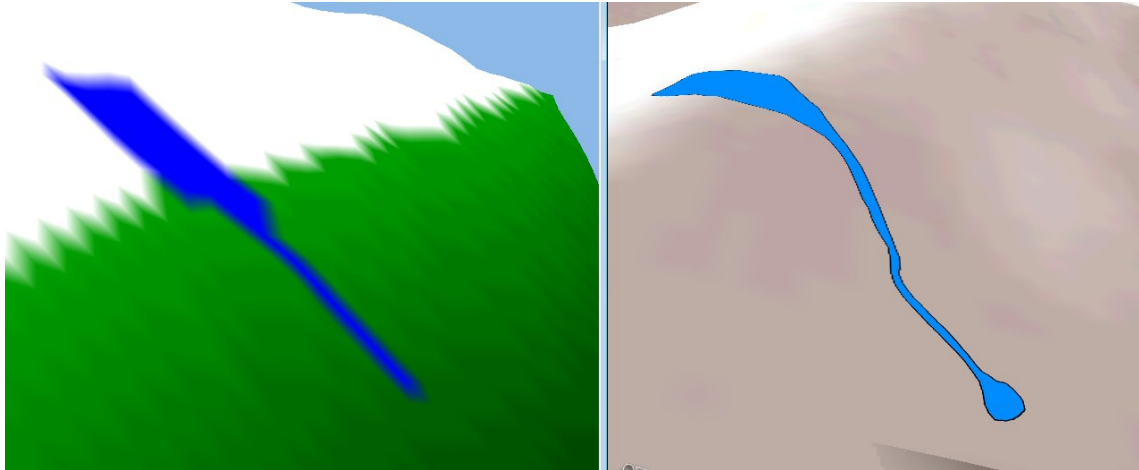


Figura 5.12: comparació gràfica de l'allau RUD006200408 amb els paràmetres $coef.i = 0.60$ i $coef.p = 0.10$

Pel que fa a les variables resposta els resultats són força bons. En els resultats tornem a trobar particularitats amb els valors. Primer, trobem dos grups de valors: vora els 450 metres i vora els 750 metres. Això com ja ha succeït en altres experiments, és degut al perfil del terreny.

Per la comparació gràfica s'ha seleccionat la parella de paràmetres que durant tots els experiments s'ha utilitzat. Les dues figures coincideixen notablement tot i no disposar de la resolució necessària per poder analitzar a fons la forma del camí.

5.9 Anàlisi dels resultats

5.9.1 Introducció

Després d'una fase d'experimentació durant un procés de calibració cal analitzar els resultats per aconseguir o acostar-se a l'objectiu dels experiments: trobar el valor idoni de les variables experimentals. L'anàlisi dels resultats consisteix en comparar els valors de les variables resposta resultants de la simulació amb els valors reals procedents dels informes. En alguns casos aquesta comparació pot ésser objectiva i mitjançant l'ús de procediments estadístics es pot obtenir fàcilment el valor òptim de les variables experimentals. No obstant, tal i com s'ha vist durant els experiments, la comparació és més complicada en el cas de les allaus. Per comparar els resultats d'una simulació amb els d'un informe es poden utilitzar les *variables resposta* i la *representació gràfica*:

- ▷ En el primer cas, la comparació és més senzilla i objectiva, ara bé, les circumstàncies fan que els valors siguin aproximats i tinguin un marge d'error força gran. Quan s'obtenen els valors en el simulador la precisió depèn de la resolució de la informació geogràfica. En el cas dels experiments la resolució és molt baixa (30m) i s'ha de tenir en compte a l'hora d'interpretar els resultats. Tanmateix, definir la cartografia de l'allau tampoc és un procés precís ja que l'observació d'una allau és una tasca difícil.
- ▷ La comparació gràfica és una font d'informació molt útil però a la vegada difícil de treballar-hi. Tot i que la informació tampoc és precisa (30m de resolució) pot ajudar a descartar valors que a priori basant-nos en les variables resposta donariem per bons i viceversa. Ara bé, la comparació gràfica que pot ser molt atractiva per una persona no és una tasca fàcil de sistematitzar. La comparació gràfica és un procés complex i poc objectiu.

Per altra banda, la informació recollida als experiments no és la única que s'obté durant una simulació, a l'Annex C s'adjunta un fitxer complet dels resultats d'una simulació. Aquesta informació pot ésser útil per a posteriors fases de validació o bé una vegada el model ja estigui validat.

5.9.2 Mapa de resultats

Els experiments que s'han dissenyat han variat per a cada allau i escenari que s'ha preparat. Això ha estat així perquè a partir dels resultats d'un experiments es podia

dissenyar un experiment més adequat pel següent escenari. Inicialment el rang del $coef.p$ ha estat entre 0.05 i 0.50; a partir dels resultats d'aquest experiment s'han pogut redissenyar els experiments per obtenir resultats més precisos. Aquest fet dificultarà la realització d'un mapa de resultats on es mostri l'efectivitat de cada parella de variables ja que no es disposen tots els resultats de totes les combinacions possibles.

Com ja s'ha comentat a la introducció d'aquesta secció, l'anàlisi dels resultats en el cas de les allaus és una tasca bastant subjectiva. No obstant s'ha elaborat un sistema per intentar minimitzar-ne l'efecte. El rang escollit pel mapa de resultats ha estat el següent:

$$coef.i = \{0.30, 0.45, 0.60, 0.75\}$$

$$coef.p = \{0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.20\}$$

Per a cada parella de variables s'ha valorat el resultat de la simulació. Per un total de 5 experiments s'ha valorat el resultat donant una puntuació de 0 a 3 segons l'èxit d'aquest. Per aquesta puntuació s'ha tingut en compte tant les variables resposta com les representacions gràfiques.

El resultat es mostra a les figures 5.13 i 5.14. Ambdós gràfics representen el mateix resultat mostrat en diferents perspectives. L'eix x representa el $coef.p$ $[0.00, 0.20]$, l'eix y el $coef.i$ $[0.3, 0.9]$ i l'eix z la valoració o puntuació resultant de les simulacions $[0, 15]$.

Els gràfics apunten a una configuració òptima al voltant dels valors $coef.p = 0.10$ i $coef.i = 0.6$. Aquest és un resultat força significatiu i es pot dir que la fase de calibració ha donat bons resultats. No obstant, no és suficient per donar el model per vàlid, i les raons ja han aparegut durant el capítol. Ara bé, un model que s'ha sotmès a una primera calibració dona peu a posteriors fases i mètodes de validació, el més interessant dels quals és el Test de *Túring*.

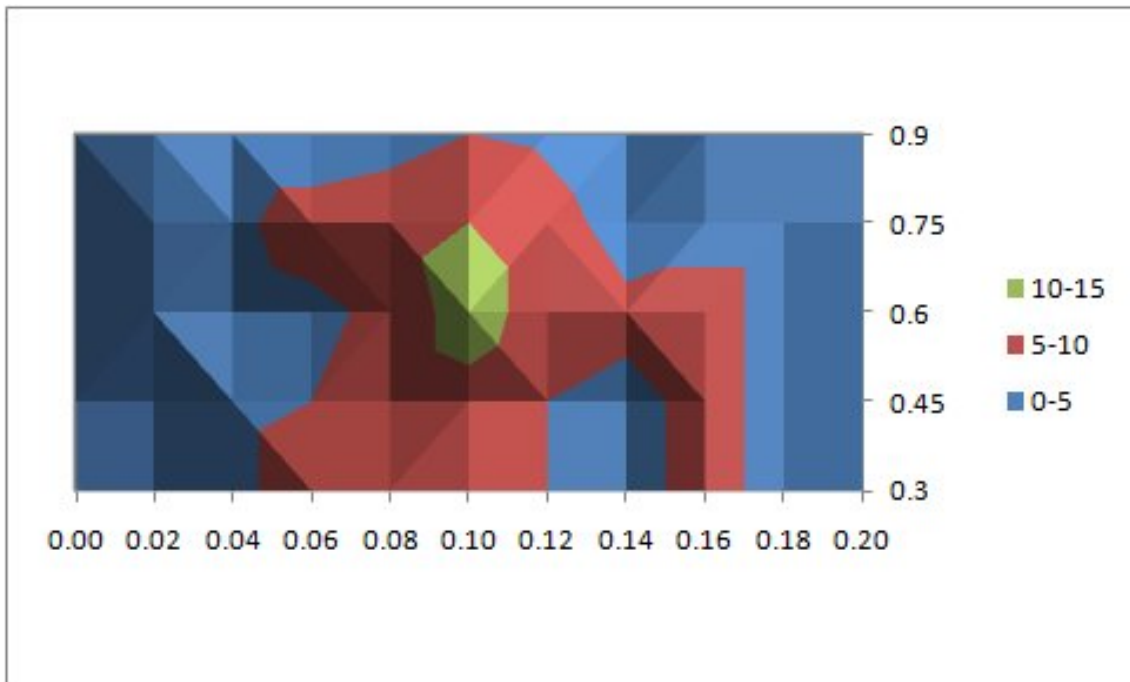


Figura 5.13: mapa de resultats (1)

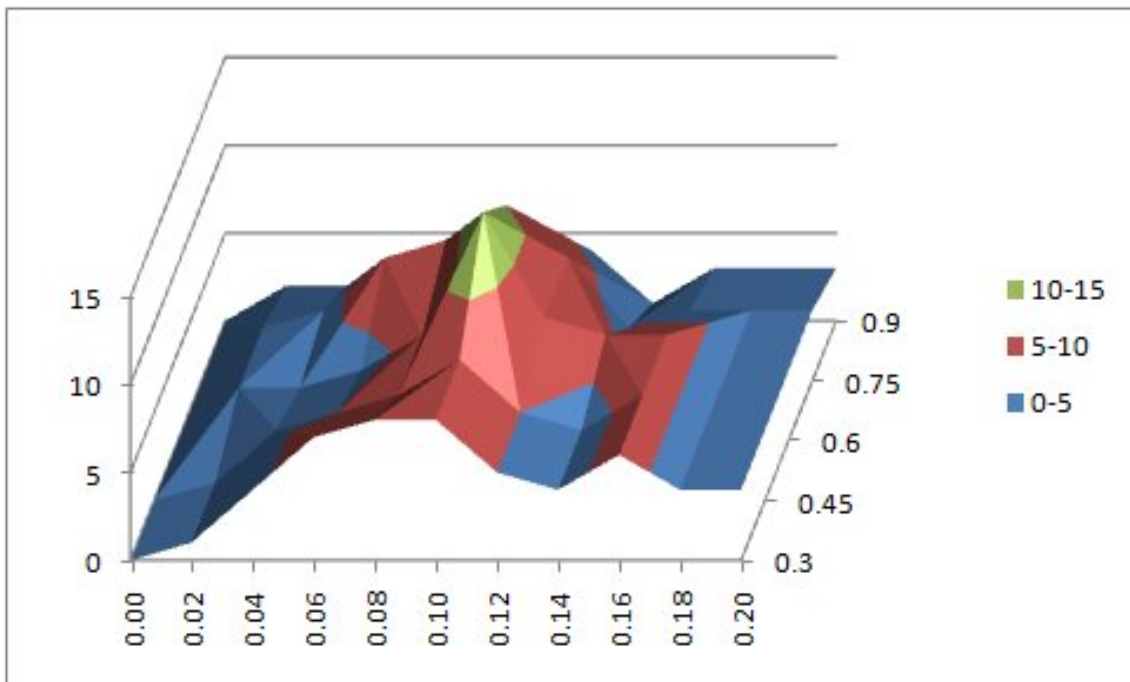


Figura 5.14: mapa de resultats (2)

5.10 Test de *Túring*

La utilització de tests objectius no sempre són suficients per la validació d'un model. Concretament en els casos on les dades experimentals són poc precises i/o difícils d'obtenir és quan s'han de buscar mètodes alternatius i complementaris per validar.

En el cas del simulador d'allaus el Test de *Túring* és la millor opció per seguir la fase de validació operacional. Gràcies a la tasca de calibració es disposa d'una configuració que, dins les limitacions de les dades, dona bons resultats.

L'objectiu de qualsevol Test de *Túring* és el de corroborar si una màquina actua de manera intel·ligent, que en simulació seria corroborar si la simulació actua com el sistema real. Aquest test no es tracte d'un procediment específic, sinó que es pot plantejar de diverses formes.

Un procediment idoni pel cas de les allaus podria ser el següent: disposant de l'ajuda d'especialistes, es generarien informes d'allaus simulades que, barrejats amb informes reals, haurien de passar desapercebut als ulls dels experts. El punt més important del test és el de dissenyar el format d'aquests informes. Ambdós informes (el real i el simulat) han de coincidir i per tant ha de ser possible generar aquest format comú a partir dels resultats de la simulació i les dades experimentals.

Realitzar el Test de *Túring* no és l'objectiu d'aquest projecte però sí que s'ha tingut en compte que aquest seria un dels objectius posteriors. Els resultats obtinguts fins ara poden donar peu a més col·laboracions de l'IGC, fet que permetria el contacte amb experts en allaus. La validació és un procediment continu que a mida que es va avançant augmenten les possibilitats i els resultats.

Capítol 6

Conclusions i Treball Futur

6.1 Conclusions

L'objectiu del projecte era clar a més d'ambició, aconseguir un model *vàlid* de simulador d'allaus. La validesa d'un model és un valor relatiu; un model és més vàlid quan més processos de validació ha superat i a la vegada, un model és vàlid fins que es demostra el contrari. Així doncs, el que pot fer un model vàlid és l'experimentació amb aquest.

Un procés de validació, com ja s'ha explicat, consisteix en revisar capa a capa el model de simulació. Tot i que es pensava que el projecte es centraria en la part d'experimentació, finalment no ha estat així. Durant l'anàlisi del model es van detectar hipòtesis invàlides, cosa que va fer necessari tornar a especificar el model. En altres paraules, el procés ha tingut importància en els tres nivells de validació i verificació (veure secció 2.5.2).

Com amb molts projectes de simulació, els conceptes que hi intervenen són nombrosos i variats, fent que el capítol de *Marc Teòric* ocupi una part molt important de la memòria. La dinàmica i tipologia d'allaus, els SIG i la teoria dels autòmats cel·lulars formen la base d'aquest projecte; són temes els que s'hi ha invertit molt temps d'investigació i que han fet que el projecte sigui molt complet i profitós a nivell personal.

6.2 Treballs futurs

Tal com ja s'ha comentat, el procés de validació i verificació (VV) és un procés continu. Per tant en conceptes generals s'ha de dir que el treball futur més important és el de seguir amb el procés amb l'objectiu d'aconseguir un model més valid. Les vies per continuar el procés són diverses i algunes ja s'han esmentat:

- **Seguir amb l'exerimentació** reforçaria la validesa dels resultats i ajudaria a solucionar possibles errors en el simulador.
- **Realitzar el Test de Túring** és la principal via de continuïtat i aquesta seria una tasca molt important en el procés VV. Per això caldrà més col·laboració de l'IGC que ja ha ajudat facilitant les dades històriques de les allaus a Catalunya.
- **Començar una nova revisió del model** afegiria un nou punt de vista al model millorant-lo en tots els aspectes.
- **Millorar la qualitat dels resultats** faria més atractiu el simulador. El principal objectiu és el d'aconseguir una informació geogràfica emt millor resolució. Això, no només milloraria la precisió dels càlculs sinó que donaria peu a una millor representació gràfica de l'allau.

Actualment s'ha començat a treballar amb un PFC relacionat amb el simulador. Aquest projecte té com a objectiu reimplementar el simulador utilitzant SDLPS, un simulador distribuït que permet la definició de models mitjançant SDL. Una implementació alternativa del model mitjançant SDLPS ajudarà a evitar errors d'implementació i per tant s'aconseguirà una millor implementació del model.

Bibliografia

- [1] McClung, David & Schaerer, Peter *The Avalanche Handbook* Ed. The Mountaineers (2000).
- [2] Rodríguez Fontoba, Santiago *Simulador d'allaus*. Barcelona, 2006.
- [3] Liminiana Bernat, Sergio *Integración de datos SIG en un simulador*. Barcelona, 2006.
- [4] Fonseca i Casas, Pau; Casanovas, Josep; Montero, Jordi. 2004. *GIS and simulation system integration in a virtual reality environment*
- [5] Muñoz Castaño, José Daniel; *Autómatas Celulares y Física Digital*. Santafé de Bogotá, D. C.: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 1996
- [6] Averill M. Law, W. David Kelton; *Simulation, modeling and analysis*, 1991.

- [7] Utah Avalanche Center (<http://utahavalanchecenter.org/education/>)
- [8] American avalanche association (<http://www.avalanche.org/>)
- [9] Avalanche Center (<http://www.avalanche-center.org/>)
- [10] Institut Geològic de Catalunya (<http://www.igc.cat/>)
- [11] Institut Cartogràfic de Catalunya (<http://www.icc.cat/>)
- [12] Servei Meteorològic de Catalunya (<http://www.meteocat.com/>)

Using GIS data in a m:n-ACk cellular automaton to perform an avalanche simulation.

DATE: 04.2007

ACTIVITY: Communications

DETAILS OF THE CONFERENCE: Geographical Information Science Research UK Conference 2007. National University of Ireland Maynooth. County Kildare, Ireland - IRELAND (EIRE) (11.04.2007 - 13.04.2007).

TYPE: Full text

FORMAT: Paper (<http://ncg.nuim.ie/gisruk/materials/proceedings/>)

SUBJECT: Research

REF. MAGAZINE/BOOK: 0 901519 86 3

FIRST PAGE: 45 LAST PAGE: 50

EDITOR: Adam C. Winstanley

AUTHORS: Pau Fonseca i Casas, Santiago Rodríguez Fontoba

Annex A

Informe Allau a Raspes Roies

Se utilizaron las mismas cuatro estaciones sísmicas que en el experimento anterior. Por problemas que se atribuyen a las bajas temperaturas y a la falta de experiencia del equipo científico en este tipo de experimentos sólo funcionó bien la estación UB3. La estación UB3 se situó enfrente y a cota más baja que la zona de alud, en un lugar denominado Barranco de Mulleres, a unos 1500 m de distancia del punto de explosión. La cámara de vídeo móvil estaba situada al pie del telesilla y la cámara de vídeo fija se situó en la cima del arrastre del Pic de Ginebrell. Esta estación registró con una amplificación de 8.

Datos de campo extraídos a partir de: equipo de aludes de la UB y del ICC presentes en el experimento:

- Alud provocado el 11 de enero de 1996 (Figura 8).
- Alud mixto.
- La fractura de la zona de salida se produjo a una altitud de 2710 m s.n.m.
- Recorrido del alud de 840 m.
- Desnivel del recorrido del alud de 500 m.
- El recorrido del alud fue por una ladera de perfil cóncavo orientado al oeste.
- El alud fue de nieve densa y formó un aerosol que se depositó poco más allá de la parte densa.
- Densidad de la nieve involucrada superior a 200 kg/m³.
- Depósitos de aspecto rugoso con bolas de nieve.

- Altura de la fractura 50 cm.
- Distancia zona de detención del alud-UB3 500m.

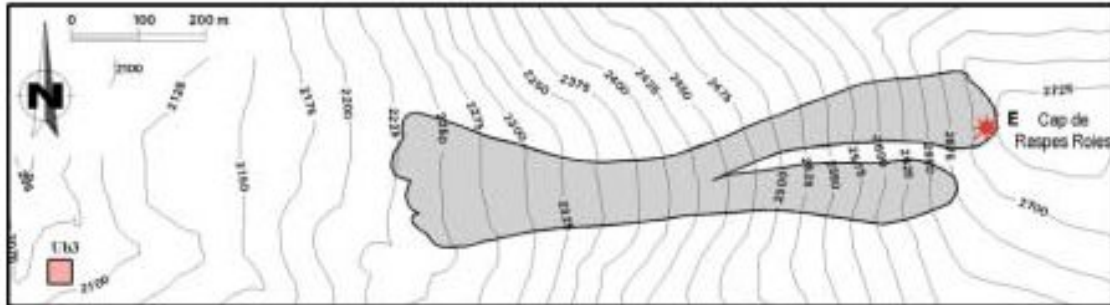


Figura A.1: Cartografía del alud de Raspes Roies provocado artificialmente el 11 de enero de 1996 en la estación de esquí de Boí Taüll. E: localización de la explosión que provocó el alud. UB3: estación sísmica que registró el alud. Cartografía realizada por Glòria Furdada Bellavista.

Registros en la estación UB3

No se pudo realizar el estudio del ruido del emplazamiento por falta de registro previo a la explosión. En los registros en el dominio temporal (Figura 9) se observa la señal de la explosión a 0 s. Gracias a las imágenes de vídeo podríamos atribuir la señal que aparece 20 s después al alud, esta señal tiene una duración de 34 s. La máxima amplitud se encuentra en la componente vertical y es de un orden de 10-6 m/s.

Se calculó el espectro total (Figura 10) de la señal comprendida entre 18.12 s y 59.08 s. En las componentes Z y E-W se distinguen cuatro picos centrados en 5 Hz, 15 Hz, 24 Hz y 45 Hz respectivamente. En la componente N-S se distingue un pico centrado en los 15 Hz. Estos registros se consideraron SSA a la hora de analizar los resultados.

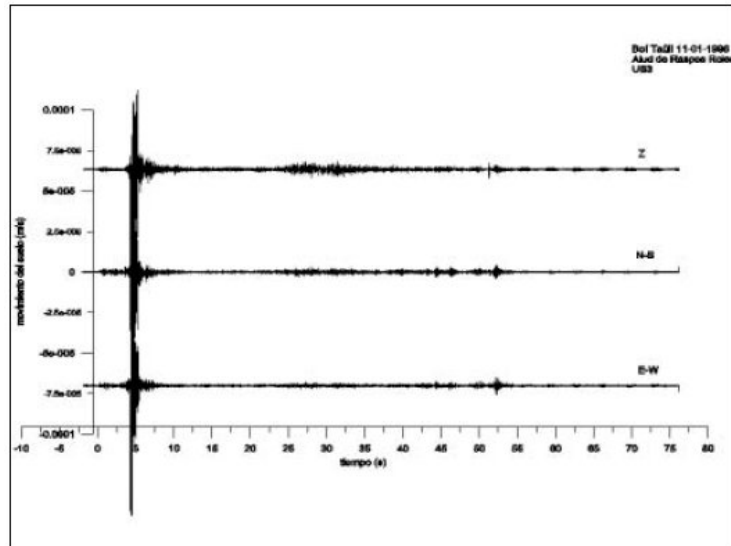


Figura A.2: Señales registradas en la estación UB3 durante el alud de Raspes Roies del 11 de enero de 1996. El alud fue provocado por una explosión

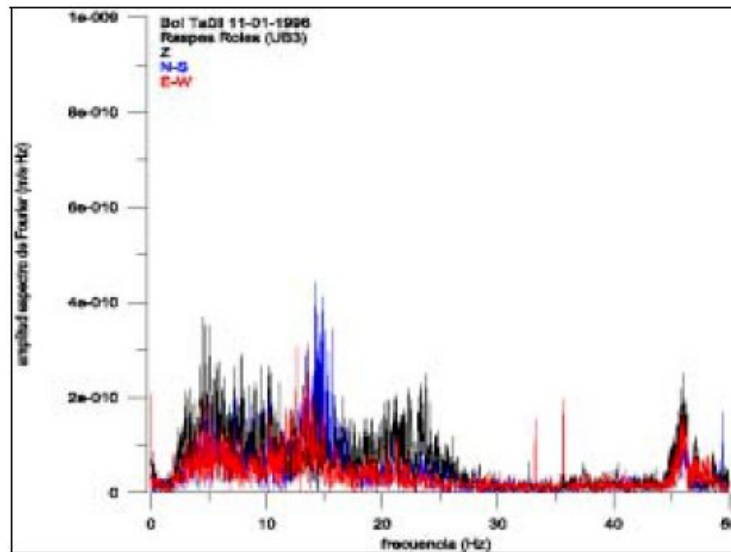


Figura A.3: Espectro de Fourier de las señales registradas en la estación UB3 durante el alud de Raspes Roies del 11 de enero de 1996. El espectro se calculó a partir de la señal comprendida entre 18.12 s y 59.08 s.

Annex B

Exemple d'AC: el joc de la vida

El joc de la vida és un autòmat cel·lular dissenyat pel matemàtic britànic John Horton Conway el 1970. De fet, el joc és de zero jugadors, és a dir, la seva evolució queda determinada tan sols pel seu estat inicial, sense que es necessiti cap mena d'interacció amb jugadors humans. La forma de jugar al joc de la vida és mitjançant la configuració del seu estat inicial, i observant com evoluciona. Existeix una variant on dos jugadors competeixen entre ells.

Regles

L'univers del joc de la vida és una malla ortogonal bidimensional infinita, de cel·les individuals, cadascuna de les quals té dos estats possibles: viu o mort. Cada cel·la interacciona amb els seus vuit veïns, que són les cel·les a què està connectada horitzontalment, verticalment o diagonalment. A cada unitat de temps, es donen les següents transicions:

- ▷ Tota cel·la viva amb menys de dos veïns vius mor (de solitud).
- ▷ Tota cel·la viva amb més de tres veïns vius mor (de sobreconcentració).
- ▷ Tota cel·la viva amb dos o tres veïns vius, segueix viva per a la següent generació.
- ▷ Tota cel·la morta amb exactament tres veïns vius torna a la vida.

Aquest patró inicial constitueix la llavor del sistema. La primera generació és creada aplicant aquestes regles simultàniament a totes les cel·les de la malla. Les regles es continuen aplicant repetidament per crear futures generacions.

Origen

Conway estava interessant en un problema presentat els anys 40 pel matemàtic *John von Neumann*, que intentava trobar una màquina hipotètica que pogués construir còpies d'ella mateixa. Va aconseguir trobar un model matemàtic amb regles molt complexes sobre una malla amb coordenades cartesianes. *Conway* va intentar simplificar les idees de *Von Neumann*, i de fet ho va aconseguir. Unint el seu èxit en el problema de *Leech* de teoria de grups amb el seu interès en les idees de *Von Neumann*, *Conway* va donar llum al Joc de la vida. Va aparèixer per primer cop a l'octubre de 1970, en un article del *Scientific American*, a la columna de *Martin Gardner* de Jocs matemàtics. Des d'un punt de vista teòric, el joc resulta molt interessant, perquè té la capacitat d'una Màquina de *Túring* universal; és a dir, tot el que pot ser computat algorísmicament pot ser computat amb un joc de la vida. *Gardner* va escriure:

El joc va fer famós a l'instant Conway, però també va obrir una nova branca en la investigació matemàtica, el camp dels autòmats cel·lulars (...) Per l'analogia del joc de la vida amb el naixement, caiguda i alteracions de la societat amb els organismes vius, pertany a una classe emergent del que s'anomenen jocs de simulació (jocs que s'assemblen a processos de la vida real).

Des de la seva publicació, ha atret molt d'interès per les maneres sorprenents com poden evolucionar els patrons. El joc de la vida és un exemple d'autoorganització. Resulta interessant per a moltes branques de la ciència, incloent la física, la biologia, l'economia, les matemàtiques o la filosofia, i d'altres ciències que observen la manera en què regles molt senzilles poden generar patrons complexos. Segurament va ajudar a la seva popularitat el fet que el joc de la vida sorgís coincidint amb l'aparició d'una nova generació d'ordinadors barats, fet que possibilitava que el joc podia desenvolupar-se durant hores en aquestes màquines, que d'altra manera quedaven sense utilitzar durant la nit. Pel que fa a aquest aspecte, la seva popularitat va ser molt superior a la que despertaria més endavant la generació per ordinador de fractals. Per a molts aficionats, el joc de la vida era simplement un repte de programació, una manera de malgastar cicles de CPU. Per altres, el joc tenia més connotacions filosòfiques. Va esdevenir objecte de culte en els anys 70 i més endavant; desenvolupament actuals han arribat a crear emulacions teòriques de sistemes d'ordinador en els límits d'un tauler del joc de la vida. *Conway* va escollir les regles amb cura, després de molta experimentació, per complir tres criteris:

- ▷ No hi hauria d'haver un patró inicial pel que existeixi una prova simple que la població pot créixer indefinidament.
- ▷ Hi hauria d'haver patrons inicials que aparentment creixin sense límit.
- ▷ Hi hauria d'haver patrons inicials simples que creixin i canviïn per un període considerable de temps abans de finalitzar de les següents maneres possibles:
 - Esvaint-se completament (per sobreconcentració o per arribar a dispersar-se en excés).
 - Entrant en una configuració estable que romangui sense canvis, o entrant en una fase oscil·latòria en què es repeteix un cicle sense fi de dos o més períodes.

Annex C

Exemple del fitxer de resultats

Paràmetres:

Coefficient Inèrcia: 0.900000

Coefficient Penalització intern: 0.140000

Temps: 0.00 s	Coord: 1635 -> 1568	H: 2280.1 m	Vel0: 0.000 m/s	A: 0.55 m/s ²	M: 220.50 kg	Gruix: 0.490 m
Temps: 0.00 s	Coord: 1505 -> 1438	H: 2319.2 m	Vel0: 0.000 m/s	A: 1.86 m/s ²	M: 220.50 kg	Gruix: 0.490 m
Temps: 0.00 s	Coord: 1438 -> 1371	H: 2280.5 m	Vel0: 0.000 m/s	A: 2.29 m/s ²	M: 436.59 kg	Gruix: 0.970 m
Temps: 7.22 s	Coord: 1371 -> 1304	H: 2238.6 m	Vel0: 16.520 m/s	A: 3.10 m/s ²	M: 436.59 kg	Gruix: 0.970 m
Temps: 7.86 s	Coord: 1438 -> 1371	H: 2280.5 m	Vel0: 14.607 m/s	A: 4.00 m/s ²	M: 8.91 kg	Gruix: 0.020 m
Temps: 9.86 s	Coord: 1304 -> 1237	H: 2204.4 m	Vel0: 24.724 m/s	A: 1.54 m/s ²	M: 436.59 kg	Gruix: 0.970 m
Temps: 11.73 s	Coord: 1237 -> 1170	H: 2179.9 m	Vel0: 27.600 m/s	A: 0.73 m/s ²	M: 436.59 kg	Gruix: 0.970 m
Temps: 13.41 s	Coord: 1170 -> 1103	H: 2159.3 m	Vel0: 28.823 m/s	A: 0.86 m/s ²	M: 436.59 kg	Gruix: 0.970 m
Temps: 13.82 s	Coord: 1568 -> 1501	H: 2249.4 m	Vel0: 7.579 m/s	A: -0.13 m/s ²	M: 220.50 kg	Gruix: 0.465 m
Temps: 15.01 s	Coord: 1103 -> 1036	H: 2138.1 m	Vel0: 30.208 m/s	A: 1.82 m/s ²	M: 436.59 kg	Gruix: 0.970 m
Temps: 16.59 s	Coord: 1036 -> 969	H: 2112.1 m	Vel0: 33.066 m/s	A: 1.50 m/s ²	M: 436.59 kg	Gruix: 0.970 m
Temps: 18.02 s	Coord: 969 -> 902	H: 2087.8 m	Vel0: 35.210 m/s	A: -0.11 m/s ²	M: 436.59 kg	Gruix: 0.922 m
Temps: 19.32 s	Coord: 902 -> 835	H: 2070.8 m	Vel0: 35.070 m/s	A: -1.01 m/s ²	M: 414.76 kg	Gruix: 0.876 m
Temps: 20.61 s	Coord: 835 -> 768	H: 2057.3 m	Vel0: 33.763 m/s	A: -10.41 m/s ²	M: 394.02 kg	Gruix: 0.832 m
Temps: 20.89 s	Coord: 1501 -> 1434	H: 2222.1 m	Vel0: 6.687 m/s	A: 1.23 m/s ²	M: 209.48 kg	Gruix: 0.465 m
Temps: 22.66 s	Coord: 768 -> 702	H: 2078.2 m	Vel0: 12.474 m/s	A: -9.66 m/s ²	M: 374.32 kg	Gruix: 0.790 m
Temps: 26.34 s	Coord: 1434 -> 1367	H: 2187.5 m	Vel0: 13.401 m/s	A: 1.78 m/s ²	M: 209.48 kg	Gruix: 0.465 m
Temps: 29.42 s	Coord: 1367 -> 1300	H: 2161.7 m	Vel0: 18.878 m/s	A: 0.67 m/s ²	M: 209.48 kg	Gruix: 0.465 m
Temps: 31.81 s	Coord: 1300 -> 1233	H: 2141.4 m	Vel0: 20.468 m/s	A: -0.46 m/s ²	M: 209.48 kg	Gruix: 0.442 m
Temps: 34.08 s	Coord: 1233 -> 1166	H: 2125.8 m	Vel0: 19.428 m/s	A: -0.23 m/s ²	M: 199.00 kg	Gruix: 0.420 m
Temps: 36.45 s	Coord: 1166 -> 1099	H: 2109.3 m	Vel0: 18.877 m/s	A: 1.44 m/s ²	M: 189.05 kg	Gruix: 0.420 m
Temps: 38.82 s	Coord: 1099 -> 1032	H: 2085.3 m	Vel0: 22.284 m/s	A: 2.29 m/s ²	M: 189.05 kg	Gruix: 0.420 m
Temps: 40.90 s	Coord: 1032 -> 965	H: 2056.6 m	Vel0: 27.032 m/s	A: -3.36 m/s ²	M: 189.05 kg	Gruix: 0.399 m
Temps: 42.68 s	Coord: 965 -> 964	H: 2051.3 m	Vel0: 21.059 m/s	A: -7.79 m/s ²	M: 179.60 kg	Gruix: 0.379 m

Estadístiques:

Distància màxima: 618.47 m

Desnivell màxim: 359.60 m

Massa transportada: 2925.00 kg

Massa dipòsit: 2794.13 kg

Massa perduda: 130.87 kg

Força màxima: 1355.44 N

Velocitat màxima: 35.21 m/s

Acceleració màxima: 4.00 m/s²

Pendent màxim: 54.40 deg

Pendent mínim: -34.86 deg

Durada Allau: 42.68 seg

Annex D

Manual d'usuari: Creació d'un escenari

Preparació de l'escenari

La primera part del procediment consisteix en aconseguir els fitxers que representen l'escenari i carregar-los al simulador. El model de representació escollit és l'Idrisi32. Aquest sistema de representació geogràfica (SIG) és bàsicament raster tot i que permet incorporar informació vectorial. Idrisi32 es basa en dos tipus de fitxers, un fitxer d'extensió amb les dades i un altre amb les metadades descriptives del fitxer de dades.

Per començar necessitem la informació de les altures, les elevacions del terreny. Per l'obtenció d'aquests fitxers s'han utilitzat dues eines:

- El mapa interactiu de l'Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC).
- El LandC

Des del web de l'ICC (<http://www.icc.cat/>) es pot accedir al mapa interactiu de Catalunya. Aquesta aplicació ens permet trobar les zones on volem reproduir les allaus i obtenir fàcilment les coordenades d'aquest punt. Com es pot veure a la figura D.1 amb un simple click podem obtenir les coordenades UTM. Un cop s'han aconseguit les coordenades que delimiten l'àrea d'interès, aquestes s'han d'introduir al programa LandC. Aquest programa es nodreix d'una base de dades Access que indexa els fitxers MDT que contenen la informació de les elevacions del terreny. A la figura D.2 es pot veure una captura d'aquesta aplicació.

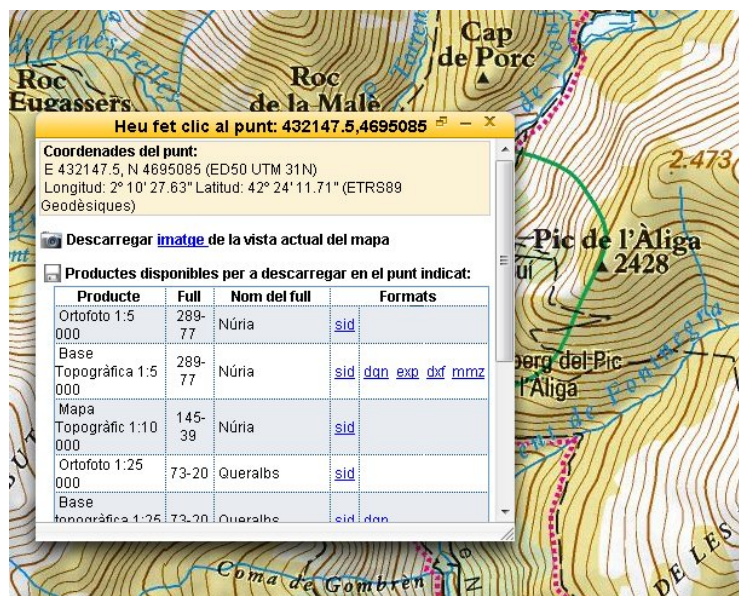


Figura D.1: Obtenció de coordenades mitjançant el mapa de l'ICC

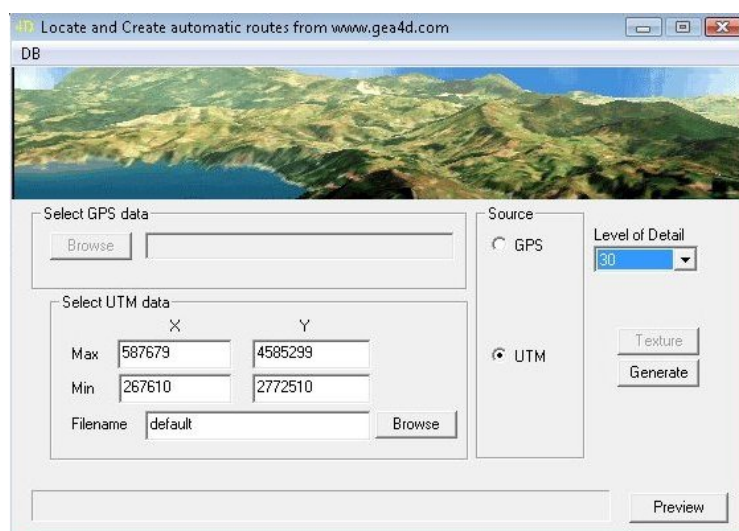


Figura D.2: Captura de pantalla de l'aplicatiu LandC

Un cop s'ha executat el LandC amb les coordenades de la zona d'interès s'obtenen els dos fitxers que representen les altures. Aquesta és la capa principal del sistema però no és la única necessària per realitzar una simulació. Essencialment es necessiten 4 capes (veure secció 4.1.2 per a més informació):

Capa de les altures Representa en metres l'altura de cada punt de l'escenari (vallnuria.img i vallnuria.doc).

Capa del terreny Descriu mitjançant una numeració el tipus de terreny de cada cel·la de l'escenari (vallnuria_terreny.img i vallnuria_terreny.doc).

Capa de gruixos Aquesta capa emmagatzema el gruix de la neu *movible* en metres. La neu *movible* és aquella que es pot desplaçar i desencadenar una allau. (vallnuria_gruix.img i vallnuria_gruix.doc).

Capa del trencament Aquesta és una capa vectorial que representa el trencament de l'allau (vallnuria_trenc.vec i vallnuria_trenc.dvc).

S'ha creat la capa d'altures però per poder començar falta que es creïn dues capes més: la del terreny i la dels gruixos (ja que la capa de trencament es crea durant l'execució del simulador). Per ajudar amb la tasca de crear aquestes dues capes, s'ha afegit una eina al simulador (figura D.3). Aquesta eina, a partir d'uns paràmetres (cota de la neu, gruix, etc.) i del fitxer de les altures, crea les dues capes restants.

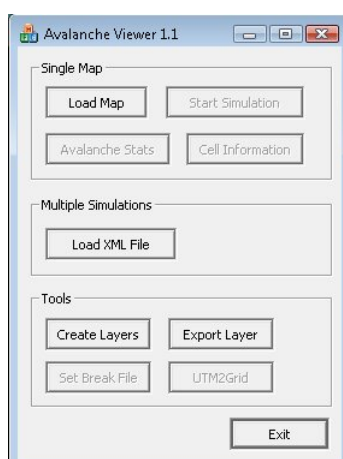


Figura D.3: Captura de pantalla del simulador d'Allaus

Inserció del trencament

El simulador que estem tractant crea l'escenari a partir de les capes esmentades a l'apartat anterior. L'escenari queda representat amb una matriu on cada cel·la té les dimensions especificades en els fitxer raster de les capes. Les cel·les de la matriu tindran una correspondència amb les coordenades UTM. Per fer més fàcil la tasca de conversió entre coordenades UTM i cel·les de la matriu, s'ha afegit una eina al simulador que ens permet fer aquesta conversió (figura D.4).

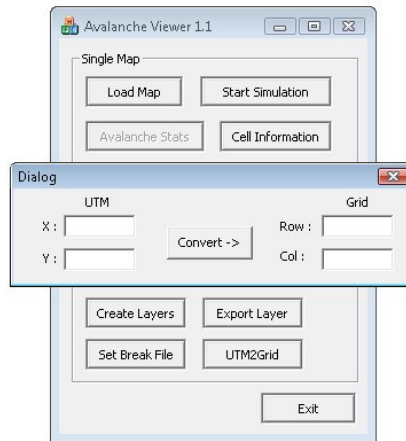


Figura D.4: Captura de pantalla de l'eina per convertir les coordenades

Un cop sabem el conjunt de cel·les que componen l'àrea de trencament, caldrà obrir el diàleg 'Set Break' del simulador (figura D.5

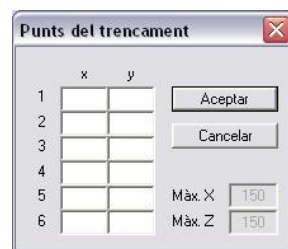


Figura D.5: Captura de pantalla del diàleg d'inserció del trencament

Dins aquest diàleg es podran inserir un màxim de 6 cel·les les quals representaran l'àrea de trencament. Caldrà introduir la coordenada X (files de la matriu) i la Y (columna de la matriu) de cada cel·la. L'aplicatiu inforarà de les dimensions d'aquesta matriu i donarà un missatge d'error si sobrepassem aquests límits.

Annex E

Manual d'usuari: Execució de simulacions

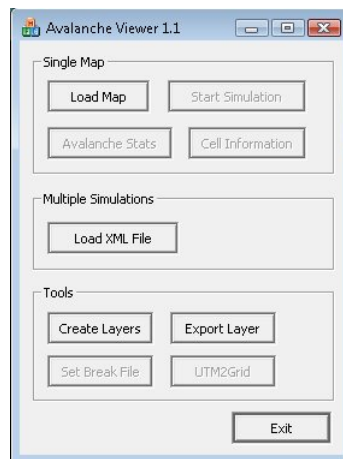


Figura E.1: Captura de pantalla del simulador d'Allaus

Execució d'un Escenari

La durada de la simulació depen del tamany de l'àrea i la distància que recorre l'allau. Una allau mitjana en un mapa de 50x50 cel·les pot durar uns 2 segons. En acabada la simulació, se'ns generen dos arxius de resultats: un arxiu amb la informació de l'allau simulada (.txt) i un altre amb la representació en 3D (.wrl).

Per executar una simulació primer hem de carregar un escenari. Si premem el botó 'Load Map' l'aplicació ens demanarà que escollim un arxiu .sdlps. Si l'escenari és correcte aquest es carregarà a la memòria i s'habilitarà el botó 'Start Simulation'. Al clicar sobre 'Start Simulation' la simulació començarà. Un cop la simulació

acaba, s'habilita el botó 'Avalanche Stats' des d'on podrem consultar algunes de les estadístiques de la simulació. A més a més, es generen els dos arxius de resultats dins la carpeta /Resultats/.

Execució de multiples simulacions

Per executar multiples simulacions caldrà un fitxer .xml que descrigui les simulacions que s'han de realitzar. Aquest fitxer descriu dos conjunts: *conjunt d'escenaris* i *un conjunt de jocs de paràmetres*. S'anomenarà un *joc de paràmetres* a una parella de valors de *coeficient de penalització* i *d'inèrcia*.

Així, donat un *conjunt d'escenaris* i *un conjunt de jocs de paràmetres*, es pretén realitzar la simulació de tots els casos resultants de la intersecció dels dos conjunts. El format de l'arxiu és el representat al següent exemple:

```
<experiments>
<escenaris>
<escenari name="Nuria1" />
</escenaris>

<parametres>
<joc coefinercia="0.3" coefpenal="0.05" />
<joc coefinercia="0.3" coefpenal="0.10" />
<joc coefinercia="0.3" coefpenal="0.15" />
<joc coefinercia="0.3" coefpenal="0.20" />
<joc coefinercia="0.3" coefpenal="0.25" />
<joc coefinercia="0.3" coefpenal="0.30" />
<joc coefinercia="0.3" coefpenal="0.35" />
<joc coefinercia="0.3" coefpenal="0.40" />
<joc coefinercia="0.3" coefpenal="0.45" />
<joc coefinercia="0.3" coefpenal="0.50" />
<joc coefinercia="0.6" coefpenal="0.05" />
<joc coefinercia="0.6" coefpenal="0.10" />
<joc coefinercia="0.6" coefpenal="0.15" />
<joc coefinercia="0.6" coefpenal="0.20" />
<joc coefinercia="0.6" coefpenal="0.25" />
<joc coefinercia="0.6" coefpenal="0.30" />
<joc coefinercia="0.6" coefpenal="0.35" />
<joc coefinercia="0.6" coefpenal="0.40" />
<joc coefinercia="0.6" coefpenal="0.45" />
<joc coefinercia="0.6" coefpenal="0.50" />
<joc coefinercia="0.9" coefpenal="0.05" />
<joc coefinercia="0.9" coefpenal="0.10" />
<joc coefinercia="0.9" coefpenal="0.15" />
<joc coefinercia="0.9" coefpenal="0.20" />
<joc coefinercia="0.9" coefpenal="0.25" />
<joc coefinercia="0.9" coefpenal="0.30" />
<joc coefinercia="0.9" coefpenal="0.35" />
<joc coefinercia="0.9" coefpenal="0.40" />
<joc coefinercia="0.9" coefpenal="0.45" />
<joc coefinercia="0.9" coefpenal="0.50" />
</parametres>
</experiments>
```

Si s'introduís el fitxer XML d'exemple al simulador es realitzarien un total de 30 simulacions, en aquest cas hi ha un sol escenari i 30 jocs de paràmetres.

Perquè aquestes simulacions es puguin executar, els arxius i carpetes dels diferents escenaris han de complir una jerarquia. Tal com mostra la figura E.2, els fitxers i carpetes que intervenen a la simulació es situaran de la següent manera:

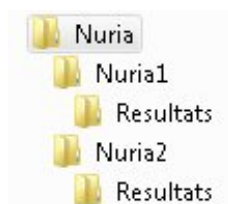


Figura E.2: Jerarquia de carpetes

- **Nuria.** Aquesta és la carpeta arrel de la simulació. A part de les carpetes *Nuria1* i *Nuria2* conté el *fitxer XML* que defineix la bateria de simulacions i, després de la simulació, contindrà el fitxer de resultats *informe.txt*.
- **Nuria1 i Nuria2.** Aquestes carpetes contenen els fitxers ràster que defineixen l'escenari. Més informació sobre els fitxers ràster a l'Annex D.
- **Resultats.** Hi ha una carpeta *Resultats* per cada escenari. Dins hi resten els resultats detallats de la simulació i la representació en 3D d resultant. Es pot veure un exemple de fitxer de resultats detallat a l'Annex C.

Les simulacions s'executaràn en l'ordre especificat a l'arxiu XML. A mida que van acabant les simulacions, van apareixent els fitxers de resultats dins la carpeta /Resultats/. A més del fitxer de resultats, es genera un informe que resumeix els resultats de totes les simulacions. Tot seguit es mostra el fitxer informe resultant de l'exemple de fitxer XML:

Informe:		0.600, 0.200	684.763, 385.000
		0.600, 0.250	607.454, 372.500
Escenari: Nuria1		0.600, 0.300	697.782, 399.000
Inputs Outputs		0.600, 0.350	658.635, 385.400
(coef.i, coef.p)	(dist, desn)	0.600, 0.400	593.970, 352.000
0.300, 0.050	924.175, 436.700	0.600, 0.450	615.549, 353.600
0.300, 0.100	865.852, 429.900	0.600, 0.500	488.365, 298.800
0.300, 0.150	807.775, 424.000	0.900, 0.050	780.577, 390.700
0.300, 0.200	750.000, 409.500	0.900, 0.100	615.549, 353.600
0.300, 0.250	615.549, 353.600	0.900, 0.150	684.763, 385.000
0.300, 0.300	615.549, 353.600	0.900, 0.200	615.549, 353.600
0.300, 0.350	632.851, 381.200	0.900, 0.250	615.549, 353.600
0.300, 0.400	618.466, 359.600	0.900, 0.300	658.635, 385.400
0.300, 0.450	615.549, 353.600	0.900, 0.350	658.635, 385.400
0.300, 0.500	488.365, 298.800	0.900, 0.400	593.970, 352.000
0.600, 0.050	697.782, 399.000	0.900, 0.450	615.549, 353.600
0.600, 0.100	684.763, 385.000	0.900, 0.500	488.365, 298.800
0.600, 0.150	713.092, 402.100		

Llista de Taules

2.1	Velocitat d'una allau segons el tipus de neu	26
2.2	Verificació i Validació en els diferents nivells de modelització	42
5.1	Dades allau NUR029199801	77
5.2	Condicions escenari Núria1	78
5.3	Resultats de l'Experiment1 de Núria1	78
5.4	Dades allau NTR184200301	80
5.5	Condicions escenari NogueraTor1	81
5.6	Resultats de l'Experiment1 de NogueraTor1	82
5.7	Variable experimental <i>Distància</i>	83
5.8	Variable experimental <i>Desnivell</i>	83
5.9	Dades allau RaspesRoies96	85
5.10	Condicions escenari RaspesRoies1	86
5.11	Resultats de l'Experiment1 de RaspesRoies1	87
5.12	Variable experimental <i>Distància</i>	88
5.13	Variable experimental <i>Desnivell</i>	89
5.14	Comparativa de les variables resposta	90
5.15	Condicions escenari RaspesRoies2	91
5.16	Comparativa canviant la cota de neu de placa	92
5.17	Dades allau SMR170200604	94
5.18	Condicions escenari SantMarti1	95
5.19	Resultats de la variable <i>distància</i> de l'Experiment1 de SantMarti1 . .	95
5.20	Resultats de la variable <i>desnivell</i> de l'Experiment1 de SantMarti1 . .	96

5.21	Dades allau RUD006200408	97
5.22	Condicions escenari Ruda1	98
5.23	Resultats de la variable <i>distància</i> de l'Experiment1 de Ruda1	98
5.24	Resultats de la variable <i>desnivell</i> de l'Experiment1 de Ruda1	99

Llista de Figures

2.1	Força impulsora i forces de resistència	22
2.2	Pendents i forces	23
2.3	Composta de fragments de la placa, possibl�� núvol de pols	25
2.4	Entrada d'aire, neu en suspensió	25
2.5	Impacte d'allau de neu seca	27
2.6	Impacte d'allau de neu humida	27
2.7	Un SIG pot mostrar informació en capes temàtiques	28
2.8	Capes raster i vectorial per un SIG	29
2.9	procés VV	40
2.10	Mètode de validació per caixa negra	44
4.1	Propagació de la fractura	54
4.2	Cel·les destí d'una cel·la origen en moviment	55
4.3	Cos lliure en un pla inclinat	58
4.4	Càlcul del pendent	58
4.5	Coefficient de fricció per a cada terreny	60
4.6	A: 2005.5m, B: 2007m, C: 2006m	61
4.7	Diagrama del sistema	65
4.8	Diagrama d'estats	66
4.9	Diagrama Procés Buit	67
4.10	Diagrama Procés Estàtic	68
4.11	Diagrama Procés Dinàmic	70
5.1	Efecte de la regla d'inèrcia	75

5.2	Informació sobre l'allau NUR029199801	77
5.3	Representacions gràfiques de l'Experiment1 a l'escenari Núria1) . . .	79
5.4	Informació sobre l'allau NTR184200301	80
5.5	Comparativa gràfica del l'allau NTR184200301, paràmetres $coef.i = 0.60$ i $coef.p = 0.10$	84
5.6	Informació gràfica de l'allau de Raspes Roies	85
5.7	Comparativa del camí amb els paràmetres $coef.i = 0.60$ i $coef.p = 0.10$	90
5.8	Comparativa del camí amb els paràmetres $coef.i = 0.60$ i $coef.p = 0.10$ amb dues cotes diferents	93
5.9	Informació sobre l'allau SMR170200604	94
5.10	comparació gràfica de l'allau SMR170200604 amb els paràmetres $coef.i = 0.60$ i $coef.p = 0.10$	96
5.11	Informació sobre l'allau RUD006200408	97
5.12	comparació gràfica de l'allau RUD006200408 amb els paràmetres $coef.i = 0.60$ i $coef.p = 0.10$	99
5.13	mapa de resultats (1)	102
5.14	mapa de resultats (2)	102
A.1	Cartografía del alud de Raspes Roies provocado artificialmente el 11 de enero de 1996 en la estación de esquí de Boí Taüll. E: localización de la explosión que provocó el alud. UB3: estación sísmica que registró el alud. Cartografía realizada por Glòria Furdada Bellavista. . .	112
A.2	Señales registradas en la estación UB3 durante el alud de Raspes Roies del 11 de enero de 1996. El alud fue provocado por una explosión	113
A.3	Espectro de Fourier de las señales registradas en la estación UB3 durante el alud de Raspes Roies del 11 de enero de 1996. El espectro se calculó a partir de la señal comprendida entre 18.12 s y 59.08 s. . .	113
D.1	Obtenció de coordenades mitjançant el mapa de l'ICC	119
D.2	Captura de pantalla de l'aplicatiu LandC	119
D.3	Captura de pantalla del simulador d'Allaus	120
D.4	Captura de pantalla de l'eina per convertir les coordenades	121
D.5	Captura de pantalla del diàleg d'inserció del trencament	121

E.1	Captura de pantalla del simulador d'Allaus	122
E.2	Jerarquía de carpetes	124

